

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE HUERTO CASERO AUTOMATIZADO PARA EL
CULTIVO DE HONGOS COMESTIBLES (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) EN
ESPACIOS INTERIORES.**

**LINA MARÍA ANAYA SAMPAYO
PAULA JIMENA CORONADO GUZMÁN**

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE BIOINGENIERÍA
BOGOTÁ DC
2019 - I**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE HUERTO CASERO AUTOMATIZADO PARA EL
CULTIVO DE HONGOS COMESTIBLES (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) EN
ESPACIOS INTERIORES.**

**LINA MARÍA ANAYA SAMPAYO
PAULA JIMENA CORONADO GUZMÁN**

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD: PRODUCTO**

TUTOR: HERNANDO EFRAÍN LEÓN RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE BIOINGENIERÍA
BOGOTÁ DC
2019 - I**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	11
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
INTRODUCCIÓN	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
1.1. Árbol de problemas	22
ANTECEDENTES	24
JUSTIFICACIÓN	27
4. OBJETIVOS	29
4.1 OBJETIVO GENERAL	29
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
5. MARCO REFERENCIAL	30
5.1. La importancia de los hongos comestibles en la dieta.	30
5.1.1. Generalidades	30
5.1.2. Hongos comestibles	31
5.1.2.1 Ascomycetes	31
5.1.2.2 Basidiomycetes	32
5.1.3. Cultivo de hongos comestibles	32
5.1.4. Requerimientos físicos para el crecimiento y desarrollo de los hongos.	33
5.1.4.1 Cultivo de L. edodes (Shiitakes).	34
5.1.4.2 Cultivo de P. ostreatus (Orellanas).	36
5.1.4 Elaboración del sustrato	37
5.1.5. Eficiencia biológica (EB)	37
5.2. ¿Qué es la automatización y por qué la importancia de la misma?	37
5.2.1. Sensores	39
5.2.1.1. Sensor de temperatura y humedad relativa (DHT22):	39
5.2.1.2. Sensor de humedad del suelo (YL-69).	40
5.2.1.3. Sensor de intensidad de luz LDR	40
5.2.1.4 Sensor de ultrasonido HC-SR04	41
5.2.2. Actuadores	41
5.2.2.1. Resistencia térmica	41
5.2.2.2. Humidificador ultrasónico	42
5.2.2.3. Tiras LED	42
5.2.2.4. Ventiladores	42
5.2.2.5.OLED	43
5.2.2.6 ESP32 WiFi Bluetooth	43

5.3. ¿Para qué es necesario el uso de un microcontrolador (MCU)?	44
5.3.1 Arduino	44
5.3.1.1 Arduino Mega 2560	44
5.4. Clasificación acciones de control: ON-OFF y ON-OFF con histéresis.	45
5.4.1. Acción de control ON-OFF (Encendido - Apagado)	45
5.4.2. Acción de control ON-OFF (Encendido-Apagado) con histéresis.	46
5.5. La Función de Transferencia	46
6. MARCO LEGAL	49
7. LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS	51
7.1. Requerimientos funcionales del cliente:	51
7.2. Requerimientos funcionales de los hongos comestibles (<i>Lentinula</i> spp. y <i>Pleurotus</i> spp.):	51
7.3. Requerimientos técnicos del cliente:	52
7.4. Requerimientos técnicos de los hongos comestibles (<i>Lentinula</i> spp. y <i>Pleurotus</i> spp.):	52
7.5. Requerimientos funcionales del diseño del prototipo funcional de huerto casero automatizado:	53
7.6. Requerimientos técnicos del diseño del prototipo funcional de huerto casero automatizado:	54
7.7. Matriz QDF	55
8. METODOLOGÍA	56
8.1. Fase 0: Estudio de las condiciones que favorecen el crecimiento y desarrollo de los hongos y del lugar de ejecución dentro de la vivienda.	56
8.1.1. Cultivo de los hongos.	56
8.1.1.1 Obtención de los hongos	57
8.1.1.2 Implementación de un prototipo artesanal el desarrollo de los hongos	58
8.1.1.3 Etapa de incubación	58
8.1.1.4 Etapa de fructificación	59
8.1.1.5 Etapa de cosecha	59
8.1.1.6 Etapa de post-cosecha	59
8.1.2 Lugar de ejecución dentro de la vivienda	59
8.2. Fase 1: Construcción del prototipo automatizado para el desarrollo y crecimiento de los hongos.	60
8.2.1. Selección de componentes a utilizar para el sistema de monitoreo y control.	60
8.2.2. Calibración de los sensores	62
8.2.2.1 Sensor DHT-22.	62
8.2.2.2 Sensor YL-69.	63
8.2.2.3 HR-SC04	63
8.2.3 Sistema de monitoreo	63
8.2.4 Sistema de control	64
8.2.4.1. Selección del sistema de control	65
8.2.4.2 Sistema de calefacción	67
8.2.4.3 Sistema de ventilación	67
8.2.4.4 Sistema de riego	68

8.2.4.5 Sistema lumínico	68
8.2.4.6. Sistema de alimentación	68
8.2.5 Sistema de alerta	68
8.2.6 Sistema de visualización	69
8.2.7 Sistema de monitoreo y control	70
8.2.8 Software	72
8.2.8.1 Software en Arduino	72
8.2.8.2 Software en MATLAB	73
8.2.9 Diseño de la cámara de incubación y fructificación	73
8.3. Fase 2: Evaluación del huerto casero automatizado	81
8.3.1. Evaluación de la producción de hongos en el huerto automatizado y el prototipo artesanal.	81
8.3.2. Evaluación del consumo energético del prototipo de huerto automatizado	82
8.3.3. Costo mensual de operación	82
8.4. Fase 3: Desarrollo del manual de usuario	83
9. RESULTADOS	84
9.1. Fase 0: Estudio de las condiciones que favorecen el crecimiento y desarrollo de los hongos y del lugar de ejecución dentro de la vivienda	84
9.1.1 Cultivo de hongos	84
9.1.1.1 Obtención de los hongos.	84
9.1.1.2 Implementación de un prototipo artesanal para el desarrollo de los hongos <i>Pleurotus ostreatus</i> y <i>Lentinula edodes</i> .	84
9.1.1.3 Etapa de incubación	85
9.1.1.4 Etapa de fructificación	86
9.1.1.5 Etapa de cosecha	87
9.1.2 Lugar de ejecución dentro de la vivienda	88
9.2 Fase 1: Construcción del prototipo automatizado para el desarrollo y crecimiento de los hongos.	89
9.2.1. Selección de componentes a utilizar para el sistema de monitoreo y control.	89
9.2.2 Calibración de los sensores	90
9.2.2.1 Sensor DHT22	90
9.2.2.2. Sensor YL-69	94
9.2.3 Sistema de monitoreo	96
9.2.3.1 Temperatura y humedad relativa	96
9.2.3.2 Humedad del suelo	96
9.2.3.3 Sensor de luz	97
9.2.4 Sistema de control	98
9.2.4.1 Selección del sistema de control	98
9.2.4.2 Sistema de calefacción	100
9.2.4.3 Sistema de ventilación	110
9.2.4.4 Sistema de riego	120
9.2.4.5 Sistema lumínico	125
9.2.5 Sistema de alerta	127
9.2.6 Sistema de visualización	128
9.2.7 Sistema de monitoreo y control	128

9.2.8 Software	129
9.2.8.1 Software en Arduino	129
9.2.8.2 Software en MatLab	129
9.2.9 Diseño de la cámara de incubación y fructificación	130
9.3. Fase 2: Evaluación del huerto casero automatizado	131
9.3.1. Evaluación de la producción de hongos en el huerto automatizado y el prototipo artesanal.	131
9.3.2. Cálculo del consumo energético del prototipo.	141
9.4 Fase 3: Desarrollo del manual de usuario	142
10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	143
10.1 Discusión sobre el diseño e implementación del prototipo de huerto casero	143
10.2. Discusión del sistema de control en etapa de incubación	143
10.3 Discusión del sistema de control en etapa de fructificación	144
10.4. Discusión sobre el crecimiento y desarrollo de <i>Pleurotus</i> spp. y <i>Lentinula</i> spp.	145
10.5. Consumo energético del huerto automatizado.	146
11. CONCLUSIONES	148
12. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO	149
BIBLIOGRAFÍA	150
ANEXOS	157

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Etapas de desarrollo del hongo shiitake</i>	35
<i>Tabla 2. Requerimientos funcionales del cliente.</i>	51
<i>Tabla 3. Requerimientos funcionales de los hongos comestibles.</i>	52
<i>Tabla 4. Requerimientos técnicos del cliente.</i>	52
<i>Tabla 5. Requerimientos técnicos de los hongos comestibles (Lentinula spp. y Pleurotus spp.)</i>	53
<i>Tabla 6. Requerimientos funcionales del diseño del prototipo de huerto casero de hongos comestibles.</i>	53
<i>Tabla 7. Requerimientos técnicos del diseño del prototipo de huerto casero de hongos comestibles.</i>	55
<i>Tabla 8. Comparación del sensor de temperatura y humedad relativa</i>	62
<i>Tabla 9. Comparación del sensor humedad del suelo</i>	62
<i>Tabla 10. Comparación del sensor de luz.</i>	63
<i>Tabla 11. Comparación de los tipos de control de acuerdo a cómo se genera la acción de control.</i>	67
<i>Tabla 12. Tipo de notificación del sistema de alerta desde el módulo WiFi</i>	71
<i>Tabla 13. Tipo de mensaje en el sistema de visualización por medio del OLED</i>	72
<i>Tabla 14. Cantidad de componentes electrónicos de la huerta casera automatizada de hongos comestibles (Lentinula spp. y Pleurotus spp.)</i>	73
<i>Tabla 15. Entradas y salidas del sistema</i>	74
<i>Tabla 16. Dimensiones componentes electrónicos para el diseño del prototipo de huerto casero automatizado</i>	75
<i>Tabla 17. Medidas del prototipo artesanal para la ubicación de los hongos</i>	86
<i>Tabla 18. Componentes escogidos para el huerto automatizado</i>	92
<i>Tabla 19. Registro de las temperaturas tomadas cada 5 minutos del termómetro y el sensor DHT-22</i>	93
<i>Tabla 20. Promedios de cada lectura en el termómetro de referencia y el sensor DHT-22</i>	93
<i>Tabla 21. Registro de las humedades relativas cada 5 minutos del higrómetro y el sensor DHT-22</i>	95
<i>Tabla 22. Promedios de cada lectura del sensor de referencia y el DHT-22</i>	95
<i>Tabla 23. Registro de las humedades del suelo cada 5 minutos del higrómetro y el sensor YL-69</i>	96
<i>Tabla 24. Promedios de cada lectura del sensor de referencia y el YL-69</i>	96
<i>Tabla 25. Activación de los actuadores para la incubación</i>	101
<i>Tabla 26. Activación de los actuadores para la fructificación</i>	101
<i>Tabla 27. Medidas del prototipo preliminar y final del huerto casero para la ubicación de los hongos</i>	132
<i>Tabla 28. Número de días para aparición de primordios en cosecha de Pleurotus ostreatus.</i>	134
<i>Tabla 29. Número de días para la cosecha de Pleurotus ostreatus.</i>	135
<i>Tabla 30. Eficiencia biológica de la primera cosecha de Pleurotus ostreatus.</i>	136
<i>Tabla 31. Tamaño de los carpóforos de Pleurotus ostreatus.</i>	138
<i>Tabla 32. Número de días para aparición de primordios en cosecha de Lentinula edodes</i>	139
<i>Tabla 33. Número de días para la cosecha de Lentinula edodes (shiitakes).</i>	140

<i>Tabla 34. Eficiencia biológica de la primera cosecha de Lentinula edodes.</i>	<i>141</i>
<i>Tabla 35. Tamaño de los carpóforos de Lentinula edodes.</i>	<i>142</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Árbol de problemas</i>	23
<i>Figura 2. Hongos producidos de la empresa FarGreen a partir de los desechos de las producciones de arroz en Vietnam</i>	24
<i>Figura 3. GrowCycle Kits</i>	25
<i>Figura 4. Pleurotus djamor para consumo en las cocinas</i>	25
<i>Figura 5. (a) Hifa septada. (b) Hifa cenocítica (no septada)</i>	30
<i>Figura 6. (a) Trufas (Tuber melanosporum); (b) Una colmenilla (Morchella esculenta)</i>	31
<i>Figura 7. Hongos comestibles basidiomicetos. a) Lentinula edodes (shiitake), b) Pleurotus ostreatus (Orellanas), c) Agaricus bisporus (champiñón)</i>	32
<i>Figura 8. Cultivo y producción de hongos comestibles</i>	33
<i>Figura 9. Lentinula edodes (shiitake)</i>	34
<i>Figura 10. Cultivo de Pleurotus ostreatus</i>	36
<i>Figura 11. La salida del sistema se debe a la interacción de entrada del proceso</i>	38
<i>Figura 12. Sistema de control de lazo abierto.</i>	38
<i>Figura 13. Sistema de control de lazo cerrado.</i>	39
<i>Figura 14. Principio de funcionamiento de un sensor.</i>	39
<i>Figura 15. Sensor DHT22</i>	40
<i>Figura 16a. YL-69 y módulo YL-38</i>	40
<i>Figura 16b. Módulo Sensor LDR</i>	41
<i>Figura 17. Sensor ultrasonido HR-SR04</i>	41
<i>Figura 18. Resistencia térmica o de calefacción</i>	42
<i>Figura 19. Humidificador ultrasónico 24V</i>	42
<i>Figura 20. Tiras LED</i>	42
<i>Figura 21. a. Ventilador SparkFun 5V</i>	43
<i>Figura 21. b. Ventilador turbo 12V</i>	43
<i>Figura 22. Módulo OLED 0.91" 128x32</i>	44
<i>Figura 23. ESP32 WiFi Bluetooth</i>	44
<i>Figura 24. Arduino MEGA 2560</i>	45
<i>Figura 25. Diagrama de bloques acción de control ON-OFF en función del error del sistema</i>	46
<i>Figura 26. Acción de control de temperatura ON-OFF</i>	46
<i>Figura 27. Acción de control de temperatura ON-OFF con histéresis</i>	47
<i>Figura 28. Representación de la ganancia de un sistema</i>	47
<i>Figura 29. Matriz QDF del producto del trabajo de grado</i>	55
<i>Figura 30. Diagrama de flujo de la metodología (Anaya & Coronado, 2019)</i>	56
<i>Figura 31. Metodología del cultivo de hongos</i>	56
<i>Figura 32. Autoclave ubicado en Setas de Siecha en Machetá-Cundinamarca</i>	57
<i>Figura 33. Cabina de flujo laminar ubicada en etas de Siecha en Machetá-Cundinamarca</i>	57
<i>Figura 34. Cuarto de incubación y de fructificación. Setas de Siecha, ubicados en Machetá-Cundinamarca</i>	58
<i>Figura 35. Mesón de cocina en la localidad de Usaquén</i>	60
<i>Figura 36. Diagrama de bloques del sistema automatizado</i>	60
<i>Figura 37. Diseño del circuito de sistema de monitoreo para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (Lentinula spp. y Pleurotus spp.) realizado en Fritzing</i>	64

<i>Figura 38. Diseño del circuito de sistema de control para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (Lentinula spp. y Pleurotus spp.) realizado en Fritzing</i>	65
<i>Figura 39. Diseño del circuito de sistema de alerta para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (Lentinula spp. y Pleurotus spp.) realizado en Fritzing</i>	69
<i>Figura 40. Diseño del circuito del sistema de visualización para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (Lentinula spp. y Pleurotus spp.) realizado en Fritzing (Lentinula spp. y Pleurotus spp.</i>	70
<i>Figura 41. System Identification MATLAB</i>	74
<i>Figura 42. Modelado prototipo artesanal del huerto casero de hongos comestibles en 3D.</i>	75
<i>Figura 43. Renderizado del prototipo artesanal del huerto casero de hongos comestibles en 3D.</i>	75
<i>Figura 44. Planos del prototipo preliminar de la cámara de incubación y fructificación para hongos Lentinula spp. y Pleurotus spp.</i>	76
<i>Figura 45. a. Modelado prototipo preliminar del huerto casero de hongos comestibles en 3D.</i>	76
<i>Figura 45. b. Modelado prototipo preliminar del sistema de riego en 3D</i>	77
<i>Figura 46. a. Renderizado prototipo preliminar en 3D del huerto casero. Vistas en perspectiva</i>	77
<i>Figura 46. b. Sistemas de control del prototipo preliminar en 3D del huerto casero. Vistas en perspectiva</i>	77
<i>Figura 47. Planos del prototipo final de la cámara de incubación y fructificación para hongos Lentinula spp. y Pleurotus spp.</i>	79
<i>Figura 48. Modelado prototipo final en 3D. Vistas en perspectiva</i>	79
<i>Figura 49. a. Renderizado prototipo final en 3D. Vistas en perspectiva</i>	80
<i>Figura 49. b. Sistemas de control prototipo final en 3D. Vistas en perspectiva</i>	40
<i>Figura 50. Evaluación del consumo energético del prototipo</i>	82
<i>Figura 51. Estructura en balsa del prototipo artesanal.</i>	85
<i>Figura 52. Estructura en balsa del prototipo artesanal con recubrimiento de hule negro.</i>	86
<i>Figura 53. Primordios de Pleurotus ostreatus (orellanas) obtenidos en el prototipo artesanal.</i>	86
<i>Figura 54. Primordios de Lentinula edodes (shiitakes) obtenidos en el prototipo artesanal.</i>	86
<i>Figura 55. Desarrollo de los cuerpos fructíferos de Pleurotus ostreatus</i>	88
<i>Figura 56. Desarrollo de los cuerpos fructíferos de Lentinula edodes (shiitakes) en el prototipo artesanal</i>	88
<i>Figura 57. Cosecha de Pleurotus ostreatus en el prototipo artesanal</i>	89
<i>Figura 58. Cosecha de Lentinula edodes en el prototipo artesanal</i>	89
<i>Figura 59. Mesón de cocina en la localidad de Usaquén</i>	90
<i>Figura 60. Gráfica de calibración del sensor DHT-22</i>	93
<i>Figura 61. Gráfica de calibración de humedad relativa del sensor DHT-22</i>	94
<i>Figura 62. Gráfica de calibración de humedad relativa del sensor YL-69</i>	96
<i>Figura 63. Datos de salida del sensor DHT22 desde el monitor serial de Arduino</i>	97
<i>Figura 64. Datos de salida del sensor YL69 desde el monitor serial de Arduino</i>	98
<i>Figura 65. Datos de salida del módulo LDR desde el monitor serial de Arduino</i>	98
<i>Figura 66. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas</i>	101
<i>Figura 67. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas suavizada</i>	101
<i>Figura 68. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas</i>	102

<i>Figura 69. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas</i>	103
<i>Figura 70. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas</i>	103
<i>Figura 71. Comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas en fructificación</i>	104
<i>Figura 72. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas suavizada para la fructificación</i>	104
<i>Figura 73. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la fructificación.</i>	105
<i>Figura 74. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas en la fructificación</i>	105
<i>Figura 75. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas en la fructificación.</i>	106
<i>Figura 76. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes</i>	106
<i>Figura 77. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo suavizada en shiitakes para la incubación</i>	107
<i>Figura 78. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la incubación</i>	107
<i>Figura 79. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la incubación</i>	108
<i>Figura 80. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la incubación</i>	108
<i>Figura 81. Comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en fructificación</i>	109
<i>Figura 82. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes suavizada para la fructificación</i>	109
<i>Figura 83. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la fructificación.</i>	110
<i>Figura 84. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la fructificación.</i>	111
<i>Figura 85. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la fructificación</i>	111
<i>Figura 86. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en incubación</i>	112
<i>Figura 87. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo suavizada en orellanas para la incubación</i>	112
<i>Figura 88. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la incubación</i>	113
<i>Figura 89. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la incubación</i>	113
<i>Figura 90. Respuesta al impulso del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la incubación</i>	114
<i>Figura 91. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en fructificación</i>	114
<i>Figura 92. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas suavizada en fructificación</i>	115
<i>Figura 93. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la fructificación</i>	115

<i>Figura 94. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la fructificación</i>	116
<i>Figura 95. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en incubación</i>	116
<i>Figura 96. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo suavizada en shiitakes para la incubación</i>	117
<i>Figura 97. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo suavizada en shiitakes para la incubación</i>	117
<i>Figura 98. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la incubación</i>	118
<i>Figura 99. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la incubación</i>	118
<i>Figura 100. Respuesta al impulso del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la incubación</i>	118
<i>Figura 101. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en fructificación</i>	119
<i>Figura 102. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo suavizada en shiitakes para la fructificación</i>	119
<i>Figura 103. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la fructificación</i>	120
<i>Figura 104. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la fructificación</i>	120
<i>Figura 105. Respuesta al impulso del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la fructificación.</i>	121
<i>Figura 106. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en orellanas en incubación</i>	122
<i>Figura 107. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo suavizada en orellanas en incubación</i>	122
<i>Figura 108. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la incubación</i>	123
<i>Figura 109. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en orellanas en la incubación</i>	123
<i>Figura 110. Respuesta al impulso del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en orellanas en la incubación</i>	124
<i>Figura 111. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en shiitakes en incubación.</i>	124
<i>Figura 112. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo suavizada en shiitakes en incubación.</i>	125
<i>Figura 113. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la incubación</i>	125
<i>Figura 114. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en shiitakes en la incubación</i>	126
<i>Figura 115. Respuesta al impulso del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en shiitakes en la incubación.</i>	126
<i>Figura 116. Gráfica del comportamiento longitud de onda vs tiempo en fructificación</i>	127
<i>Figura 117. Gráfica del comportamiento longitud de onda vs tiempo suavizada en fructificación</i>	127
<i>Figura 118. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en fructificación.</i>	128

<i>Figura 119. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento longitud de onda vs tiempo en la fructificación</i>	128
<i>Figura 120. Respuesta al impulso del comportamiento longitud de onda vs tiempo en la fructificación.</i>	129
<i>Figura 121. Visualización de mensajes de alerta enviados por el módulo ESP32 WiFi Bluetooth</i>	129
<i>Figura 122.a. Visualización de datos arrojados por el sensor de temperatura y humedad en etapa de incubación.</i>	130
<i>Figura 122.b. Visualización de datos arrojados por el sensor de temperatura y humedad en etapa de fructificación.</i>	130
<i>Figura 123. Sistemas de monitoreo y control hongos comestibles</i>	130
<i>Figura 124. Prototipo final de huerto casero para hongos comestibles</i>	130
<i>Figura 125. Diagrama de flujo código en Arduino</i>	131
<i>Figura 126. Diagrama de flujo código en MatLab</i>	131
<i>Figura 127. Estructura en acrílico del prototipo preliminar</i>	132
<i>Figura 128. Estructura en acrílico y triplex del prototipo final</i>	132
<i>Figura 129. Aparición de primordios de Pleurotus ostreatus. (a) Prototipo artesanal. (b) Huerto automatizado.</i>	133
<i>Figura 130. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios de la especie Pleurotus ostreatus (orellanas).</i>	134
<i>Figura 131. Datos obtenidos de la cosecha de los cuerpos fructíferos (carpóforos) de la especie Pleurotus ostreatus (orellanas)</i>	135
<i>Figura 132. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios y la cosecha de la especie Pleurotus ostreatus (orellanas).</i>	135
<i>Figura 133. Eficiencia biológica de la primera cosecha de Pleurotus ostreatus.</i>	
<i>Figura 134. Tamaño de los carpóforos de Pleurotus ostreatus (orellanas).</i>	136
<i>Figura 135. Aparición de primordios de Lentinula edodes. (a) Prototipo artesanal. (b) Huerto automatizado.</i>	137
<i>Figura 136. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios de la especie Lentinula edodes (shiitakes).</i>	138
<i>Figura 137. Cosecha de carpóforos de Lentinula edodes.</i>	138
<i>Figura 138. Datos obtenidos de la cosecha de los cuerpos fructíferos (carpóforos) de la especie Lentinula edodes (shiitakes).</i>	139
<i>Figura 139. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios y la cosecha de la especie Lentinula edodes (shiitakes).</i>	139
<i>Figura 140. Eficiencia biológica de la primera cosecha de Lentinula edodes (shiitakes).</i>	140
<i>Figura 141. Medición del cuerpo fructífero de Lentinula edodes.</i>	140
<i>Figura 142. Tamaño de los carpóforos de Lentinula edodes (shiitakes).</i>	141
<i>Figura 143. Crecimiento de Lentinula edodes (shiitakes) en el huerto automatizado.</i>	141
<i>Figura 144. Huerto automatizado con un cultivo de Lentinula edodes (shiitakes) a punto de ser cosechados.</i>	142
<i>Figura 145. Crecimiento de Pleurotus ostreatus (orellanas) en el huerto automatizado.</i>	142
<i>Figura 146. Crecimiento de Pleurotus ostreatus (orellanas) en el huerto automatizado.</i>	142

RESUMEN

El uso indiscriminado de plaguicidas en el sector agrícola genera graves impactos a nivel del medio ambiente y fauna, socioeconómico y salud pública. A saber, la contaminación de los recursos naturales, la pérdida de biodiversidad, el aumento del desperdicio de alimentos, el bajo valor nutricional, además de morbilidad y mortalidad en seres vivos. El resultado es devastador tanto a corto como a largo plazo. No obstante, los consumidores, hoy en día, se preocupan cada vez más por los alimentos que consumen y son más conscientes de la necesidad de obtener alimentos inocuos que garanticen las necesidades en salud y valor nutricional, la conservación del medio ambiente y el apoyo a la economía local. De hecho, en la última década, los mercados de alimentos orgánicos y sostenibles se han disparado pues atraen a los consumidores ya que evitan el uso de pesticidas, aditivos, preservantes y conservantes, entre otros.

Los métodos de producción limpia se están convirtiendo gradualmente en una alternativa. En este documento se presenta una huerta casera automatizada que combina la biología y la experiencia en ingeniería. En efecto la cámara de incubación y fructificación de hongos comestibles está diseñada, construida y planteada para ubicarse dentro de una cocina. Asimismo, está monitoreada y controlada por un sistema electrónico capaz de garantizar las condiciones de desarrollo y crecimiento de esta especie vegetal durante la incubación y la fructificación. El control de variables físicas como la temperatura, la humedad relativa, la humedad del suelo, distancia al fondo del reservorio de agua y la iluminación resulta en una producción máxima y más limpia de *Lentinula spp* y *Pleurotus spp*. Además, el análisis de control de nivel tipo ON/OFF se lleva a cabo en ambas etapas de incubación y fructificación, dando resultados en función de los sistemas controlados (sistema de calefacción, sistema de ventilación, sistema de riego y sistema de iluminación). Se detalla una comparación entre el tamaño y la cantidad de hongos recolectados, así como el tiempo de crecimiento y desarrollo en ambos ciclos de vida de los cultivos

Palabras clave: Huerto casero, Hongos comestibles, *Lentinula spp.*, *Pleurotus spp.*, Producción limpia, Sistema de control, Sustrato.

ABSTRACT

The indiscriminate use of pesticides in the agricultural sector engender serious impacts in the environment and fauna, socioeconomic and public health i.e. contamination of natural resources, loss of biodiversity, increase in food waste, low nutritional value, as well as morbidity and mortality in living beings. The outcome is devastating in both the short and long term. However, consumers, nowadays, are increasingly aware of what they eat and of the need to obtain safe food that guarantees the needs in health and nutritional value, the conservation of the environment and the support to the local economy. In fact, in the last decade, organic and sustainable food markets have boomed. Indeed they appeal to consumers because it avoids the use of pesticides, additives and preservatives.

Clean production methods are gradually becoming an alternative. An innovative portable farm combining biology and engineering expertise is presented in this document. In fact, an automated edible mushroom farm is designed and built inside a kitchen. It is monitored and controlled by an electronic system capable of ensuring the conditions of food development and growth during incubation and fructification. Control of physical variables such as temperature, relative humidity, soil moisture and luminosity, results in a maximum and cleaner production of *Lentinula spp* and *Pleurotus spp*. Also, the ON / OFF control analysis is carried out in both stages of incubation and fructification, yielding results depending on the controlled systems (heating system, ventilation system, irrigation system and lighting system). A comparison between the size and number of fungi harvested as well as the time of growth and development in both crop life cycles is detailed.

Key words: Clean production, Control system, Home garden, Edible fungi, *Lentinula spp.*, *Pleurotus spp.*, Substrate.

INTRODUCCIÓN

A raíz de los impactos negativos generados por el uso de plaguicidas en el medio ambiente, en la fauna y en la salud pública y por cambios en el clima que afectan la agricultura global, el sector alimentario se ha visto fuertemente afectado por los consumidores. Las empresas agrícolas productores alimentos y hasta los mismos campesinos se han visto en la tarea de buscar nuevos métodos de producción y de distribución capaces de disminuir o mitigar dichos inconvenientes, además de cumplir estrictas regulaciones sanitarias y alimentarias con el fin de alcanzar las expectativas de los consumidores. En efecto, los consumidores del segundo milenio se preocupan cada vez más por lo que se llevan a la boca en cada una de sus comidas. En este orden de ideas, demandan una mejor calidad y seguridad de los alimentos que consumen mediante el uso de prácticas limpias que generen un producto inocuo, biológico y a precios accesibles (Trienekens, *et al.*, 2008). La incorporación de prácticas sostenibles en el sector agrícola es urgente y necesaria. Tratar y disminuir las problemáticas presentadas es uno de los puntos claves dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles del Nuevo Milenio planteados por la FAO. En este trabajo, se busca incursionar en prácticas de producción limpia dentro del hogar haciendo uso de un sistema de monitoreo y control capaz de asegurar las condiciones ambientales de crecimiento y fructificación de dos familias de hongos comestibles gourmet: *Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*, siendo *Lentinula edodes* (shiitakes) y *Pleurotus ostreatus* (orellanas) las más conocidas.

Algunos de los beneficios de los hongos comestibles son amplios e importantes para la población. Por ejemplo, son una valiosa fuente de nutrientes para la salud humana, poseen propiedades medicinales, proveen beneficios económicos para países productores y, especialmente, para poblaciones rurales en países de desarrollo debido a su alto valor económico en el mercado mundial (Boa, 2005). Por estas razones, se elige el cultivo de hongos comestibles gourmet para el diseño y construcción de un huerto casero monitoreado y controlado electrónicamente, de esta forma asegurando una producción limpia. Dicho esto, la utilización de avanzadas herramientas electrónicas en el sector agrícola se convierte en una alternativa de producción limpia. Por un lado, porque reduce el número de entradas nocivas al sistema; por otro lado, produce energía renovable y, finalmente, protege los ecosistemas (Scharfy, *et al.*, 2017). Adicionalmente, asegurar y mantener la calidad del producto, le confiere propiedades organolépticas (aroma, sabor, textura, etc); higiene y propiedades sanitarias; propiedades nutricionales (suplementos nutricionales, energía, etiqueta de valores nutricionales, de ingredientes, aditivos, etc) y funcionales (precio, empaque, utilidad para el consumidor, servicio al cliente, diferenciación entre la competencia, trazabilidad, etc) (Santacoloma, *et al.*, 2011). En síntesis, el cultivo de hongos comestibles bajo una producción limpia y casera, le proporciona al consumidor actual un producto inocuo, bio y con alto valor nutricional. Asimismo, le genera al cliente la satisfacción de haber cultivado su propio alimento dentro de su hogar.

Para este trabajo, primero, se explica por qué el uso de plaguicidas, entre otras problemáticas secundarias, impacta negativamente a los seres vivos, a los recursos hídricos, al suelo, al aire y genera la disminución del valor nutricional en alimentos, muchas veces convirtiéndose así en un grave problema de salud pública. Enseguida, se exponen algunas empresas o compañías internacionales y nacionales que se dedican a la venta de hongos comestibles gourmet. Tercero, se dispone la producción limpia utilizando sistemas

de medición y control de variables físicas como un método introductorio y original a la problemática planteada anteriormente. Cuarto, se definen los principales conceptos a tener en cuenta en la biología, electrónica e ingeniería del presente trabajo con el fin de entender la metodología utilizada en las fases de estudio de las condiciones de desarrollo y crecimiento de los hongos, estudio del lugar de ejecución, elección de los componentes electrónicos y diseño y construcción del sistema de monitoreo y control de variables físicas. En quinto lugar, se presentan los resultados, los análisis y su respectiva discusión. Así como las conclusiones, las recomendaciones y trabajos futuros y el manual de usuario para el uso y mantenimiento del huerto casero automatizado.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, a pesar de que existe una mayor disponibilidad de productos químicos en el mercado, los beneficios que presentan los plaguicidas se han acompañado de números perjuicios que son **causa de morbilidad y mortalidad** en humanos y se consideran graves amenazas para el medio ambiente ya que **atacan contra los ecosistemas**, perturban las relaciones depredador-presa y son fuentes de origen de **pérdidas en la biodiversidad terrestre, aérea y marítima** (Perry et al., 2013). A modo de ejemplo, se han analizado los graves impactos en las interacciones que suceden durante el proceso de polinización y se ha concluido que el uso de insecticidas en los sistemas agrícolas cuyos procesos de polinización se relacionan con las abejas sufren de efectos letales y subletales para estas. Es necesario la adopción de otras medidas de control de plagas ya que es indispensable mantener las relaciones entre las plantas y los polinizadores con el fin de generar estabilidad en los ecosistemas (Brittain, et al., 2011). Asimismo, tanto los insecticidas como los herbicidas son capaces de contaminar los tejidos de prácticamente todas las formas de vida en la tierra, el aire, los lagos y los océanos. Primero, en cuanto a la **contaminación del suelo**, dependiendo de las propiedades químicas del plaguicida, se registran retenciones en el suelo a diferentes niveles de los componentes químicos, además, el nivel de pH y la capacidad de intercambio catiónico se ven fuertemente afectados. Lo más importante es que la fertilidad del suelo disminuye y el equilibrio del agroecosistema se destruye puesto que las poblaciones de microorganismos y fungi beneficiosos se agotan. A saber, herbicidas como el triclopyr inhibe las bacterias del suelo que transforman el amoníaco en nitrito; el glifosato reduce el crecimiento y la actividad de las bacterias fijadoras de nitrógeno en el suelo y, por su lado, el 2,4-D reduce la fijación de nitrógeno por las bacterias que viven en las raíces de las plantas de frijol y el crecimiento y actividad de las algas verde-azules fijadoras de nitrógeno (Aktar, et al., 2009). Segundo, estudios recientes demuestran presencia de plaguicidas en las aguas superficiales y aguas subterráneas. Esto se origina debido a procesos de escorrentía y filtración, respectivamente (Perry et al., 2013). Efectivamente, la **contaminación de fuentes** hídricas es una consecuencia grave del uso de pesticidas ya que genera riesgos para el medio ambiente y la salud humana, puesto que el agua es una necesidad vital para los humanos. Según un documento publicado por la FAO (Food and Agriculture Organization), para determinar este tipo de contaminación, se deben tener en cuenta estos cuatro criterios: i) la toxicidad para mamíferos y no mamíferos, ii) la persistencia, la cual está determinada por procesos bióticos y abióticos de degradación, iii) los productos degradados y iv) el destino (ambiental), es decir afinidad del producto tóxico por la materia orgánica, líquido, forma gaseosa y biota (Ongley, E. D., 1997). Tercero, se han encontrado residuos de pesticidas en la atmósfera lo que conlleva a una **contaminación del aire**. Aktar y sus colaboradores describen que en India se han encontrado componentes tóxicos en época de lluvia, aire, niebla o nieve (Aktar, et al., 2009). Algunos efectos relacionados al uso de plaguicidas en organismos ya sea por exposición o por asociación a presiones ambientales son: muerte del organismo; cánceres, tumores y lesiones en peces y animales; inhibición o fracaso reproductivo; supresión del sistema inmunitario; perturbación del sistema endocrino (hormonal); daños celulares y en el ADN; efectos teratogénicos (deformidades físicas, como las que se observan en el pico de algunas aves); problemas de salud en los peces revelados por el bajo coeficiente entre células rojas y blancas, el exceso de mucílago en las escamas y agallas de los peces, etc; efectos que solo se observarán en las generaciones futuras del organismo y, por último, efectos fisiológicos, como disminución del grosor de la cáscara de los huevos, entre otros (Ongley, E. D., 1997).

Adicional a esto, los plaguicidas tienen importantes **consecuencias en la salud humana**. De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud, se estima que cada año en el mundo se presentan aproximadamente tres millones de casos de intoxicaciones agudas con plaguicidas, de las cuales cerca de 220.000 terminan en la muerte del paciente (OMS, 2011). Incluso, el World Health Organization (WHO, por sus siglas en inglés) reportó que el

uso de pesticidas causó 110,000 suicidios por envenenamiento cada año desde 2010 hasta 2014, lo que representa el 13.7% de todos los suicidios globales (Mew, *et al.*, 2017). Dichas intoxicaciones se producen por el contacto a través de la piel, la inhalación y la ingestión (Ongley, E. D., 1997). De hecho, los grupos de alto riesgo expuestos a pesticidas incluyen tanto a los consumidores como a los agricultores y trabajadores de todas las niveles de la cadena de producción así como aquellos que están involucrados en los entornos industriales (tiendas de cadena, plazas de mercado, etc) (Aktar, *et al.*, 2009). En detalle, el uso de pesticidas organoclorados provoca trastornos endocrinos, efectos sobre el desarrollo embrionario, metabolismo lipídico y alteraciones hematológicas y hepáticas. El uso de organofosforados se ha asociado con efectos en la función de las enzimas colinesterasas, disminución de la secreción de insulina, alteración del metabolismo celular normal de proteínas, carbohidratos y grasas así como efectos genotóxicos y efectos sobre la función mitocondrial, causando estrés oxidativo celular y problemas a los sistemas nervioso y endocrino. Al igual que los carbamatos, se presentan enfermedades cardiovasculares, efectos negativos en el sistema reproductor masculino y en el sistema nervioso, demencia, y también un posible aumento del riesgo de linfoma no- Hodgkin. La exposición prenatal a los organofosforados se ha correlacionado con la disminución de la duración de la gestación y los problemas neurológicos que ocurren en los niños. El uso de glifosato, un organofosforado, genera hipertensión, diabetes, accidentes cerebrovasculares, autismo, insuficiencia renal, enfermedades de Parkinson y Alzheimer y cáncer (Nicolopoulou-Stamati, *et al.*, 2016). Además, la exposición a los plaguicidas **disminuye el valor nutricional** de los alimentos provocando deficiencias nutricionales en el hombre. De hecho, se ha demostrado que existen interacciones entre compuestos endógenos como las vitaminas y residuos de pesticidas, los cuales conducen a cambios en los parámetros nutricionales de los alimentos (Barchańska, *et al.*, 2018). Un estudio realizado por Yang y sus colaboradores afirma que los pesticidas organoclorados están implicados en la disminución de vitamina D en humanos. Esto provocaría un aumento de enfermedades crónicas cardiovasculares, cánceres e infecciones, entre otras (Yang, 2012).

Actualmente, el consumo mundial en agricultura de pesticidas es de 43% en herbicidas, 32% en insecticidas, 19% en fungicidas, y el 6% restante se divide entre reguladores del crecimiento y productos agroquímicos diversos (Perry *et al.*, 2013). En Colombia, por ejemplo, según el Banco Mundial, desde hace 20 años se incrementó el uso en toneladas de plaguicidas y la importación de plaguicidas en un 360 % (UNAL, 2015). A su vez, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), informó que Colombia produjo para el año 2010, 16.999.216 litros de herbicidas, 6.392.387 litros de insecticidas y 19.690.293 kilogramos de fungicidas (Díaz, *et al.*, 2017). En efecto, una consultoría realizada por el Departamento de Toxicología de la Facultad de Medicina de la Universidad Nacional de Colombia junto al Ministerio de Salud y Protección Social estableció que en los cultivos de arroz y tomate se emplean alrededor de diez productos con alta toxicidad, entre ellos carbamatos y fosforados. A su vez, reportes indican que la intoxicación por consumo de alimentos que no han tenido un manejo adecuado en el lavado o la cocción ocupa el segundo renglón de las emergencias en hospitales que se presentan en el país (UNAL, 2015). Pruebas de esta toxicidad se elucidan en el estudio epidemiológico y toxicológico realizado por Díaz y sus colaboradores. De hecho, de 125 agricultores de papa en la región del Cauca, se determinó que en el 10% de los casos, la actividad de la enzima acetilcolinesterasa presentó inhibición de la acetilcolinesterasa eritrocitaria (Díaz, *et al.*, 2017), enzima encargada de los impulsos nerviosos que generan el movimiento en las personas, lo que altera directamente el sistema nervioso central y causa convulsiones, dificultad al hablar y al caminar (UNAL, 2015). Se deduce, entonces, que la exposición a plaguicidas como carbamatos, organofosforados y contaminantes orgánicos persistentes (COP) del grupo de los organoclorados, constituye un grave problema de **salud pública** por los efectos en salud que desencadena en el país (Díaz, *et al.*, 2017).

Otras problemáticas secundarias que se dibujan son i) el cambio climático ya que este influye en las condiciones de la agricultura tales como la reducción de los cultivos que sólo se dan en determinadas temporadas, la proliferación de malas hierbas y pestes. A su vez, al desarrollo de plagas y enfermedades que los atacan, lo que puede contribuir a un mayor uso adicional de pesticidas; ii) el crecimiento poblacional y iii) el desarrollo urbanístico acelerado. Efectivamente, uno de los factores que más afecta a Colombia por ser un país tropical es el aumento de temperaturas al punto de considerarse extremas, trayendo consigo un incremento de la mortalidad y menores rendimientos agrícolas. A su vez, el cambio de temporadas de lluvias afecta directamente la agricultura. Por ejemplo, el caso de **“El Fenómeno de El Niño”** en los últimos años provoca anomalías en las temperaturas generando sequías graves y por ende, una disponibilidad más baja de alimentos, causando aproximadamente la pérdida del 50 al 90% de las cosechas en territorios de América Central y del Sur (FAO, 2018). Teniendo en cuenta los factores expuestos con anterioridad, Bogotá ha sido una de las ciudades que más ha sufrido diferentes cambios, sobretodo en el aspecto demográfico a lo largo de las últimas décadas (Barriga & Leal, 2011). Este incremento en la población conllevó y sigue conllevando consigo muchas responsabilidades que las políticas actuales no llegan a cubrir. Una de estas, es lograr satisfacer la necesidad básica de la alimentación. Para conseguir esto, las normativas se han centrado en la generación de nuevas alternativas como lo es la Agricultura Urbana, siendo impulsada desde 2004 por Luis Eduardo Garzón con el programa “Bogotá sin Hambre” y hoy en día continúa con el nombre “Bogotá Bien Alimentada” (Leandro, 2013). En resumen, el aumento demográfico y de urbanización en Bogotá, sumado a las condiciones climáticas del país, hace necesario el desarrollo de un prototipo original de huerto casero para espacios interiores abasteciendo a los ciudadanos de productos agrícolas en condiciones similares a las naturales y respondiendo a las necesidades urgentes en sostenibilidad alimentaria. Por ejemplo, como lo indica la FAO, mediante la implementación de políticas, programas e inclusive tecnologías que ayuden a la adaptación al cambio climático (FAO, 2018).

A continuación, se presenta el árbol de problemas que agrupa todas las causas y consecuencias de la problemática del presente Trabajo de Grado.

1.1. Árbol de problemas

A partir de la problemática descrita con anterioridad, se desarrolla un análisis de las causas y efectos que han dado origen al problema. En la Figura 1 se puede observar el árbol de problemas.

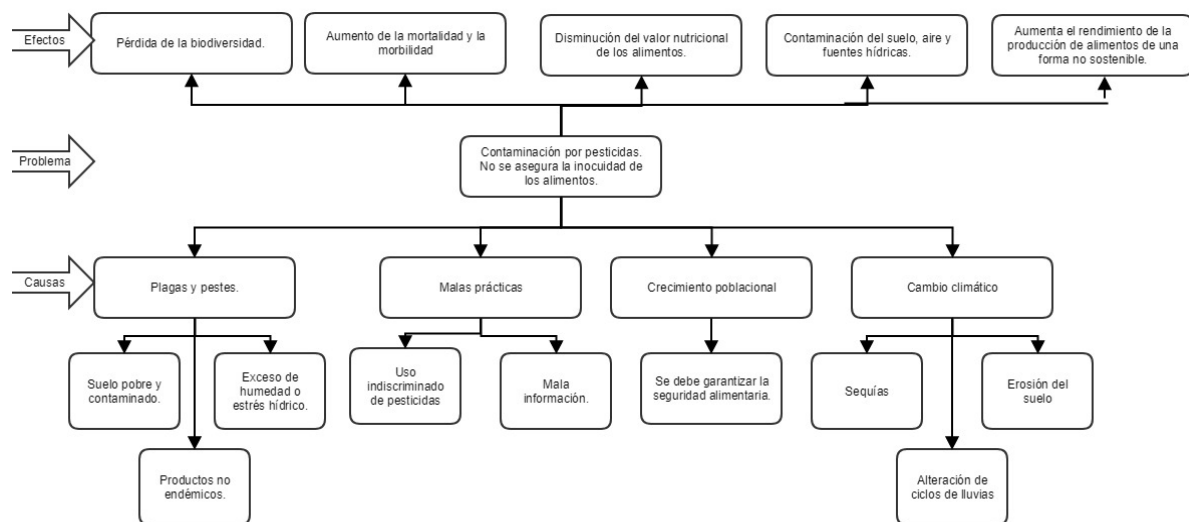


Figura 1. Árbol de problemas (Anaya & Coronado, 2019).

En conclusión, no hay duda de que el hombre ha llegado a depender en gran medida de los insecticidas químicos, ignorando así otros enfoques (biológicos y otros no químicos) para el control de plagas. Aún así, existen políticas que regulan y limitan el uso de pesticidas con el fin de proteger los alimentos, el medio ambiente y la salud humana. En Colombia, desde 1974 hasta la fecha se han venido restringiendo o prohibiendo el uso en el país de algunos plaguicidas (ICA, 2005). Sin embargo, es imperativo integrar tecnologías de automatización que controlen el medio de producción de alimentos garantizando así la calidad de estos y los beneficios nutricionales que aportan a la salud.

2. ANTECEDENTES

El cultivo de hongos comestibles en la actualidad se ha incrementado como una alternativa ideal para satisfacer necesidades proteicas y nutricionales de la población que habita en países subdesarrollados por diferentes factores tales como costos de producción bajos, alto contenido proteico y la obtención en grandes cantidades en un lapso corto de tiempo (Gómez, et. al, 2019). Sin embargo, también se han utilizado como alternativa para lidiar con el cambio climático, es así como **FarGreen** es una empresa liderada por la vietnamita Trang Tran donde se encarga de estandarizar procesos y enseñarle a los agricultores cómo utilizar sus propios desechos para realizar cultivo de hongos. Esta idea nació a partir de una problemática que se presentaba en sus país, donde los agricultores tradicionalmente quemaban la paja y las cáscaras que quedan después de las cosechas de arroz. Esta práctica ocurre dos veces al año durante dos meses seguidos, liberando humo y gases de efecto invernadero al ambiente (FarGreen, s.f.).



Figura 2. Hongos producidos de la empresa FarGreen a partir de los desechos de las producciones de arroz en Vietnam (FarGreen, s.f.).

La demanda y oferta de hongos comestibles en Colombia en comparación con otros países como China, Japón, España y México que son líderes en la producción e investigación de hongos comestibles es bastante baja. A partir del año 2010 se empezó a incrementar el cultivo de hongos comestibles como la Orellana, ya que su forma de cultivo es bastante sencilla y la inversión inicial no es alta (Mora, 2017). El nicho de este tipo de mercados se han desarrollado en cercanía a las grandes ciudades como Bogotá donde un gran número de habitantes de estrato 3, 4, 5 y 6 e incluso restaurantes gourmet son los principales interesados en este tipo de productos (Mora, 2017). En Colombia existen 4 principales empresas reconocidas que son **Setas de Cuivá**, siendo la primera empresa comercializadora de Champiñones y ahora se encuentra incursionado con las Orellanas, ubicada en Antioquia pero tiene alcance en todo el país (Mora, 2017). La segunda empresa es **Setas de Siecha**, hasta el momento tienen una trayectoria corta pero han alcanzado altas ventas a pesar del tiempo que llevan en el mercado. Se encargan de distribuir distintos hongos comestibles como los shiitake y las orellanas, ubicados en Cundinamarca (Mora, 2017). **Casorellana** es una empresa del Valle del Cauca que tiene como principal producto las orellanas y en estos momentos están manejando su sede principal en la ciudad de Bogotá. Tienen como principal objetivo la producción de setas comestibles y medicinales (Mora, 2017). Por último, se encuentra **Setas de la Sabana**, siendo una empresa que lleva aproximadamente 10 años en el mercado y sus productos ya se pueden encontrar en mercados de cadena como Éxito y Jumbo (Mora, 2017).

GroCycle es una empresa que nació en Inglaterra donde se comercializan pequeñas granjas de hongos y le venden la idea al usuario de un “Hazlo tú mismo (DIY)”, ya que se entregan los sustratos hechos a partir de desechos de café donde se acumulan las esporas y los usuarios pueden tener su producción casera de hongos que pueden consumir en el momento. Las especies que comercializan son los Shiitake y los Oyster que tienen un gran

valor nutricional. La cosecha se da en aproximadamente 14 días para que las personas puedan disfrutar de sus hongos (GroCycle, 2018).



Figura 3. GrowCycle Kits (GroCycle, 2018).

Espresso MushRoom Company es otra empresa nacida en Reino Unido que ofrece una gran variedad de hongos, siendo los Oyster los más vendidos, ya que tienen propiedades nutricionales importantes conteniendo altos niveles de proteínas y fibra, bajos en calorías y no contienen grasa ni colesterol. Además, incluyen vitaminas tales como la B y C, minerales como el Zinc, hierro, potasio, etc (Espresso Mushroom Company. , s.f.).



Figura 4. *Pleurotus djamor* para consumo en las cocinas (Espresso Mushroom Company. , s.f.).

En Colombia, se han desarrollado proyectos que han intentado automatizar los procesos de cultivos de hongos como el dirigido por la Universidad Distrital para el “**Control de temperatura y humedad para cultivo de hongos Shiitake**”, en el cual se estableció un sistema de sensores de temperatura y humedad de forma inalámbrica (Rodríguez, et. al, 2012). En el cual, el envío y la recepción de datos desde los sensores se enrutan a un microcontrolador y se visualizan los datos en pantalla a través de una interfaz de usuario, programada en Java, desde donde se monitorean las condiciones de temperatura y humedad ideales para el proceso reproductivo (Rodríguez, et. al, 2012). En el año 2017, en

Bolivia se desarrolló un **“Sistema de monitoreo y control de cámaras de incubación y fructificación para la producción de hongos comestibles y medicinales”**, en el cual se pretende desarrollar una nueva forma de producción agrícola que sea controlada para poder favorecer el desarrollo y crecimiento de los hongos (Vargas, et. al, 2017), dado que los hongos no hacen parte de la producción agrícola común por las condiciones específicas que manejaría, especialmente para la formación del micelio y para la fructificación. Por esto, es necesario un descenso de la temperatura y aumento de la humedad relativa para poder favorecer la producción. Así pues, en el proyecto se recrearon condiciones atmosféricas de manera artificial de manera controlada para poder cultivar hongos comestibles y medicinales (Vargas, et. al, 2017).

En suma, las empresas colombianas citadas anteriormente no constituyen una competencia en el país, sobre todo en cuanto a los aspectos técnicos, puesto que no cuentan con sistemas electrónicos de monitoreo y control ni con un sistema de alerta que notifique al usuario. El impacto del prototipo de huerto casero automatizado propuesto en este trabajo radica en su aplicabilidad como un sistema original y novedoso dentro del mercado bogotano. La ganancia de este modelo es su implementación en el sector agrícola urbano y su reproducibilidad como sistema de referencia en países subdesarrollados.

3. JUSTIFICACIÓN

Como consecuencia a los impactos negativos provocados en el medio ambiente y la salud pública dada la toxicología de los pesticidas, al uso excesivo de estos en el sector agrícola se hace necesaria la adopción de los principios de producción limpia con el objeto de garantizar la inocuidad de los alimentos y, de esta forma, mitigar los efectos nocivos ya mencionados. En particular, se busca que el productor tanto como el consumidor participen directamente en la búsqueda de sistemas sostenibles de producción agrícola socialmente viables, lucrativos y productivos, a la vez que se protejan la salud y el bienestar humano y de los animales, así como el medio ambiente. Además, que apliquen las técnicas de producción limpia planteadas en el manual de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) propuesto por la FAO (FAO, 2002). Esto se logra mediante i) el uso de prácticas adecuadas que minimicen el uso de agroquímicos, incluyendo el control biológico, ii) el uso de agroquímicos amigables con el medio ambiente, iii) el buen manejo de los plaguicidas y envases dentro y fuera del cultivo, iv) la prevención de contaminación de suelos y cursos de agua, v) la capacitación del personal que manipula los plaguicidas y, vi) el adecuado seguimiento de los residuos en los productos que van al consumidor. Lo anterior con el fin de satisfacer un mercado cada vez más exigente en calidad y en inocuidad (Pinto, 2016). De esta forma, se garantiza un desarrollo sostenible y una competitividad sectorial, además de asegurar la calidad dentro de la cadena productiva agrícola y la inocuidad de los productos ofrecidos.

En Colombia, la disminución o eliminación de la contaminación generada por uso indiscriminado y mal manejo de pesticidas desde su origen y las prácticas de producción limpia para la generación de productos inocuos y con un valor nutricional alto se contemplan en la Política Nacional de Producción más limpia, la Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (PSAN) y la Política Nacional Fitosanitaria y de inocuidad (Remitirse a Marco Legal en Levantamiento de Requerimientos).

En este contexto de garantizar la inocuidad de un producto con alto valor nutricional, se seleccionan productos de lujo y de comida gourmet como lo son los hongos comestibles visto que en el mercado nacional e internacional tienen una gran demanda ya que son bajos en calorías y grasa, ricos en proteínas, vitaminas y minerales, lo que implica que brindan mayor cantidad de proteína que los productos vegetales y a nivel similar a la proteína animal por lo que, además, los convierten en productos premium con un alto costo en el mercado. Se eligen las especies *Lentinula* y *Pleurotus* porque son capaces de obtener una alta producción vs. el tiempo (cada 7-10 días hay cosecha), su tabla nutricional y su gama exótica premium ya que estos productos no son originarios de Colombia. Se entiende que la implementación de cultivos de hongos comestibles dentro del marco de una producción limpia genera un paso preliminar y original en un manejo consciente de buenas prácticas agrícolas y favorables para el medio ambiente y la salud humana. La implementación del huerto casero automatizado se realiza en la cocina debido a que es un ambiente que por sus características tradicionales se debe mantener limpio y en su mayor parte esterilizado ya que es ahí donde los consumidores manejan la preparación y almacenamiento de alimentos para su consumo. Al controlar las condiciones ambientales (temperatura, humedad, intensidad de luz) de los hongos comestibles y del sustrato, se le ofrece al consumidor un alimento que ha seguido una producción satisfactoria y de calidad. GroCycle Urban Mushroom Farm, empresa británica enfocada en la producción casera de hongos, asegura que en un espacio de 10 m², es posible cultivar un promedio de 10 kg de hongos con un trabajo de 12 horas diarias (GroCycle, 2018). Enseguida, al automatizar el cultivo de hongos comestibles, se logra reducir el tiempo de trabajo y disminuir costos en comparación a la agricultura convencional. A su vez, se pueden reducir los riesgos relacionados a la contaminación del sustrato, del hongo y pérdidas de producción debido al mal uso de los recursos, obteniendo así ganancias en productividad y eficiencia a través de la tecnología, la innovación y la automatización.

En conclusión, una mejor gestión de alternativas que garanticen una producción limpia e inocuidad de los productos es urgente. Con este proyecto se busca integrar tecnologías innovadoras a través el diseño e implementación de un huerto casero controlado teniendo en cuenta las variables que condicionan el desarrollo y crecimiento de hongos comestibles para así lograr atacar factores como la contaminación del alimento por pesticidas, polución de fuentes hídricas, terrestres y aéreas, daños a microorganismos beneficiosos, poca disponibilidad de espacios de cultivo y condiciones climáticas desfavorables. Asimismo, se busca crear conciencia ambiental, mejorar la salud y el bienestar de las personas. En efecto, la producción limpia de hongos comestibles en un espacio interior está destinada a consumidores conscientes de la calidad y la seguridad de los alimentos; personas que quieran contribuir al desarrollo de prácticas agrícolas urbanas sustentables; a la comunidad vegetariana y vegana. Gracias al consumo de hongos comestibles se logra asegurar necesidades básicas de alimentación y nutrición dentro de la población urbana en Bogotá.

Como la Bioingeniería es un área que: “Usa los principios de la biología y las herramientas de la ingeniería para diseñar y desarrollar productos que incluyen dispositivos médicos, materiales biocompatibles, energías renovables, desarrollos en biotecnología, procesamiento de información proveniente de los seres vivos, entre otros, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los individuos y sociedades. Extendemos los esfuerzos a la formación de nuestros estudiantes en cuatro ámbitos: Ciencias básicas: abordan los conocimientos de biología, química, física, matemáticas y ciencias de la salud (UEIBosque, 2018)”, se justifica que como Bioingenieras integramos las ciencias básicas como la química, física, matemáticas y la biología junto con softwares diseñados que permitan mediante un sistema de control para correlacionar las variables más relevantes para así poder regular el ambiente de los hongos y mejorar la funcionalidad del sistema biológico.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo funcional de huerto casero automatizado con base en las variables físicas ambientales que intervienen en el crecimiento y desarrollo del cultivo de hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) mediante un microcontrolador WiFi y Bluetooth ESP32.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar el prototipo funcional partiendo de las condiciones de crecimiento y desarrollo de los hongos y de la ubicación en la cual se va a localizar el huerto casero automatizado.
- Construir un sistema de control que tenga en cuenta las siguientes variables físicas: temperatura ambiente, humedad relativa, humedad del sustrato, radiación y distancia del líquido al fondo del tanque para regular las condiciones de crecimiento y desarrollo de los hongos.
- Evaluar la funcionalidad del huerto casero automatizado utilizando hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) en la localidad de Usaquén de la ciudad de Bogotá.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. La importancia de los hongos comestibles en la dieta.

5.1.1. Generalidades

Los hongos son organismos eucariotas cuyos núcleos celulares se encuentran contenidos en membranas. Sin embargo, presentan características particulares que los clasifican en un reino eucariótico separado a las plantas, animales y protistas. En su gran mayoría, los hongos son pluricelulares y se encuentran conformados de pequeños filamentos, llamados **hifas**. Algunas hifas se encuentran separadas por unas paredes internas llamadas **septos** y se conocen como **hifas septadas**. Generalmente, estos septos tienen un poro central que permite que los orgánulos pequeños y en ocasiones, incluso a los núcleos, desplazarse entre las células. Otras hifas no tienen septos y se conocen como **hifas cenocíticas**, ya que tienen múltiples núcleos en un citoplasma común. Todas las hifas forman una masa entrelazada que se llama **micelio**, donde dependiendo del hongo pueden conformar un sólo micelio o varios tipos de micelios, dependiendo de las fases de su ciclo vital (Stamets, 2011).

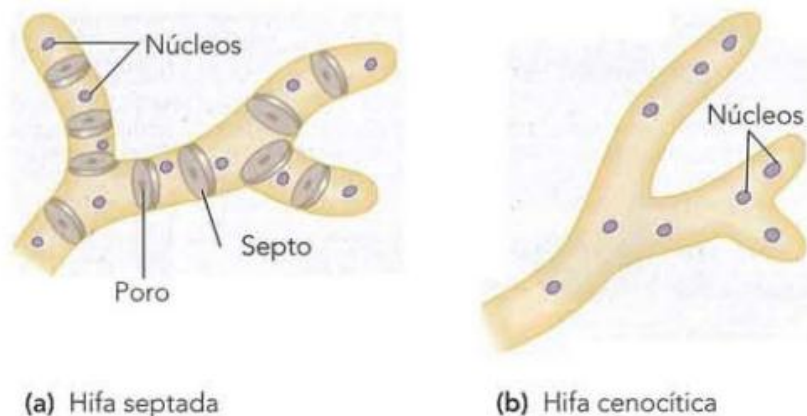


Figura 5. (a) Hifa septada. (b) Hifa cenocítica (no septada) (Stamets, 2011).

Los hongos producen esporas durante la reproducción sexual o asexual. Estas **esporas**, sirven para dispersar el hongo hacia nuevos lugares y a su vez, algunas pueden ayudar al hongo a sobrevivir en condiciones desfavorables, como la deshidratación o la congelación. Las esporas carecen de flagelos -exceptuando un filo-. En los hongos que se reproducen sexualmente, tienen fusión nuclear o **cariogamia**, bastante después de la fusión citoplásmica o **plasmogamia**. Antes de la cariogamia, los micelios que se forman mediante plasmogamia contienen dos núcleos haploides diferentes por célula. Se dice que tales micelios presentan dos núcleos (**dicarióticos**) o presentan dos núcleos diferentes (**heterocarióticos**), y su ploidía se representa como $n + n$, en lugar de n (haploide) o $2n$ (diploide) (Stamets, 2011).

Características principales de los hongos.

- Principal grupo de organismos descomponedores.
- El cuerpo vegetativo o soma, que recibe el nombre de talo está constituido por filamentos o hifas cuyo conjunto recibe el nombre de micelio.
- El núcleo es eucariótico y generalmente pequeño.
- Las paredes celulares se encuentran compuestas principalmente por **quitina**.
- Carecen de clorofila, sin embargo, presentan pigmentos que le brindan variedad de colores.
- Su división celular es mitótica y meiótica.
- La respiración es aerobia principalmente, no obstante, existen hongos microaerófilos o anaerobios facultativos.

- La nutrición es heterótrofa por absorción.
- Tienen un sistema de reproducción sexual y asexual (Stamets, 2011).

Se han descrito más de 100.000 especies de hongos y se clasifican principalmente teniendo en cuenta los detalles de su ciclo vital y morfología. Si tienen ciclos vitales muy definidos se ubican de estos cuatro filos: Chytridiomycota, Zygomycota, Ascomycota y Basidiomycota. Sin embargo, antes de la aparición de la secuenciación del ADN era difícil clasificar a los hongos que carecían de una fase sexual conocida, siendo clasificados como deuteromicetos (“hongos de segunda clase”) u *hongos imperfectos* (Stamets, 2011).

5.1.2. Hongos comestibles

Los hongos comestibles son un alimento excepcional, ya que son bajos en calorías y grasa, además de ser ricos en proteínas, vitaminas y minerales, lo que implica que brindan mayor cantidad de proteína que los productos vegetales. Los hongos comestibles que se cultivan en su gran mayoría son los ascomicetos y basidiomicetos (Chang, et. al, 2013).

5.1.2.1 Ascomycetes

Los Ascomycetes son la división con mayor número de especies del reino, existen diferentes formas y tamaños que van desde microscópicas hasta talofitas, donde los grupos más evolucionados de esta división producen cuerpos fructíferos denominados ascocarpos o esporocarpos. En las especies de ascomicetos que forman setas existen dos tipos de formaciones, donde **(i) los apotecios** presentan dos partes bien diferenciadas, siendo el himenio la parte fértil donde se producen las ascas que alojan las ascosporas y los paráfistos, que son las estructuras que ayudan a la dispersión de las esporas. Por otro lado, **(ii) los estromas** forman esporas pero no están sostenidas por un himenio, sino que se encuentran en unas cavidades llamadas apotesios, divididos en el peritecio o la parte fértil y la trama o carne que corresponde al cuerpo fructífero (Chang, et. al, 2013).

Las ascas y ascosporas en los apotecios son de manera cilíndrica y alargada que están dispuestas en forma perpendicular al excípulo y se abren para liberar las ascosporas. En cambio, en los estromas salen de las ascas por un pequeño poro. La reproducción de los ascomiceto se puede dar de manera sexual o asexual, siendo la asexual la más frecuente (Chang, et. al, 2013).

En la división de Ascomycetes, la atención se encuentra centrada en el cultivo de miembros del orden *Pezizales* como la *Morchella* y el orden *Tuberales* como la trufa. La *Morchella* conocida también como colmenillas, morillas o múrgoles, es caracterizada por poseer ascocarpos de aspectos reticulados. En general, el cuerpo frutal (seta) es lo que se utiliza y se deja una parte importante del hongo bajo tierra. *Morchella* es un hongo micorrícico que pertenece al grupo de las ectomicorrizas, en el cual las hifas rodea las raíces del árbol sin penetrar su endodermis, obteniendo así los nutrientes para subsistir. Las especies *M. conica* y *M. esculenta* son las que más se comercializan y se caracterizan por tener sombreros esponjos y piel de color amarillento (Chang, et. al, 2013).

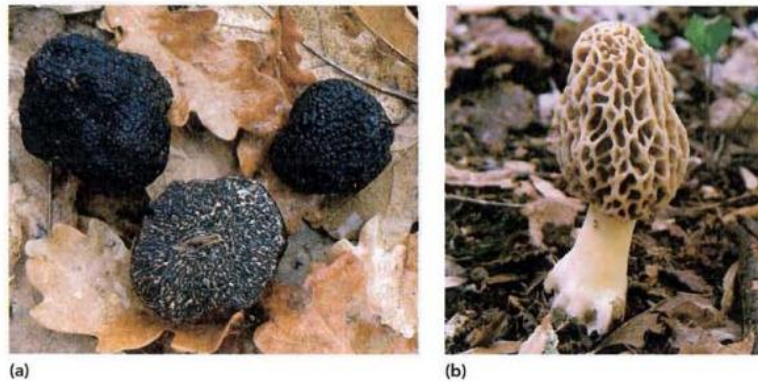


Figura 6. (a) Trufas (*Tuber melanosporum*); (b) Una colmenilla (*Morchella esculenta*)
(Chang, et. al, 2013).

5.1.2.2 Basidiomycetes

Los basidiomicetos se caracterizan por producir esporas sexuales sobre células con aspecto de bastón, denominadas basidios. Los basidiomicetos comprenden más de 14.000 especies. Una seta en realidad es un cuerpo fructífero que sobresale del suelo y que se produce durante parte del ciclo vital del hongo. Más del 90% del volumen y masa del hongo puede permanecer en la tierra en forma de micelios haploides de diferentes tipos de unión. Muchos de los hongos no se reproducen asexualmente, aunque algunas especies producen esporas asexuales (conidios). Por ejemplo en el champiñón común, los micelios de diferentes tipos se atraen mutuamente y se fusionan, produciendo hifas dicarióticas. Estas hifas se alargan y se ramifican formando un micelio dicariótico que finalmente crece por fuera del suelo y produce una seta, también conocida como **basidiocarpo** o **basidioma**. Los **basidios** son grandes células en forma de bastón que se encuentran dentro de los basidiocarpos y se encargan de producir las **basidiósporas** haploides, que producen nuevos micelios cuando germinan. Por lo general, las setas consisten en un sombrerillo (*píleo*) en el extremo de un tallo pequeño (*estípite*) (Chang, et. al, 2013).

Los hongos que se pueden cultivar para producción de sus cuerpos fructíferos son aquellos que no necesitan la presencia de otros seres vivos (particularmente árboles) con los que conviven saprofiticamente formando micorrizas. Las más conocidas de este grupo son el champiñón, las pleurotas, el shiitake, las flammulinas, etc (Chang, et. al, 2013).



Figura 7. Hongos comestibles basidiomicetos. a) *Lentinula edodes* (shiitake), b) *Pleurotus ostreatus* (Orellanas), c) *Agaricus bisporus* (champiñón)
(Sánchez, 2010).

5.1.3. Cultivo de hongos comestibles

El proceso de cultivo de los hongos implica varias operaciones diferentes, cada una de las cuales debe realizarse con cuidado. Las condiciones de preparación, inoculación, incubación y producción del sustrato dependen de las especies de hongos que se cultivarán.

(Sánchez, 2010). El primer escenario consiste en obtener micelio puro de la cepa específica de hongos. El micelio se puede obtener a partir de esporas (Fig 8. a), de una porción del hongo específico (Fig 8. b) o de varios proveedores de germoplasma (Fig 8. c). Para obtener el inóculo, el micelio se desarrolla en un grano de cereal, por ejemplo, trigo o centeno (Fig 8. d). El propósito del grano recubierto de micelio es colonizar rápidamente el sustrato específico de crecimiento en masa (Fig 8. f). El éxito de la producción de hongos depende en gran medida de la igualdad del "desove", que debe prepararse en condiciones estériles para disminuir la contaminación del sustrato (Fig 8. g) (Sánchez, 2010).

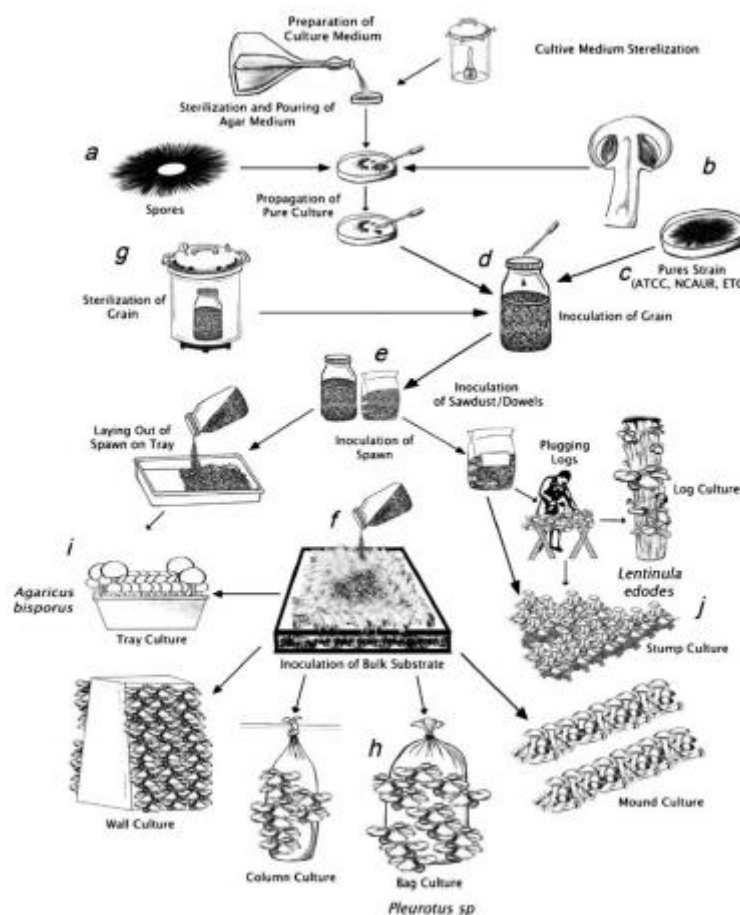


Figura 8. Cultivo y producción de hongos comestibles (Sánchez, 2010).

El empleo de hongos como las orellanas y el shiitake presenta varias ventajas tales como:

- Se pueden utilizar residuos orgánicos como desechos de algodón, cascarilla de arroz, fibra de coco, entre otros, para el crecimiento de los hongos.
- Su consumo puede ser directo, además de poseer un alto valor nutricional.
- Su eficiencia de conversión en proteína por unidad de área y por unidad de tiempo es muy superior, comparado con las fuentes de proteína animal.
- El sustrato puede ser reutilizado como abono orgánico.
- Ayudan a regular el ciclo de carbono en la naturaleza, de tal forma que reducen la acumulación de material orgánico de residuos de plantas que se acumula en la tierra (Zepeda, et. al, 2016)

5.1.4. Requerimientos físicos para el crecimiento y desarrollo de los hongos.

El crecimiento y desarrollo de los hongos se encuentra determinado tanto por factores nutricionales como por factores físicos tales como la temperatura, la humedad, luz, aireación, gravedad y tamaño de la partícula del sustrato. A continuación se evidencia la influencia de cada uno de estos factores (Zepeda, et. al, 2016) .

- **pH:** El crecimiento de la mayoría de hongos se da en condiciones ácidas, siendo un rango entre 6,5 a 6,8.
- **Temperatura:** Este es un factor determinante en el crecimiento del hongo y es el más ampliamente estudiado, dado que varía entre especies no se puede establecer un rango.
- **Humedad:** La mayoría de las especies de hongos requieren altos niveles de humedad, tanto la humedad del sustrato como del ambiente. En ciertos casos, una humedad relativa entre el 95 a 100% permite que se de un crecimiento máximo con poca pérdida del contenido de humedad del sustrato por evaporación.
- **Luz:** La luz podría ayudar al nacimiento de los primordios, sin embargo, al ser organismos no fotosintéticos no se ven muy influenciados por este factor.
- **Aireación:** El oxígeno y el dióxido de carbono son los componentes gaseosos más importantes en el desarrollo de las setas, dado que trabajan bajo procesos aeróbicos.
- **Gravedad:** La formación de los hongos presenta una relación geotrópica negativa.
- **Tamaño de partícula del sustrato:** El mejor tamaño que se considera para el desarrollo de los hongos está entre 2 y 3 cm (Zepeda, et. al, 2016).

5.1.4.1 Cultivo de *L. edodes* (Shiitakes).



Figura 9. *Lentinula edodes* (shiitake) (Cudris, 2011).

L. edodes también se conoce como "shiitake". Por muchas razones, ha sido intensamente estudiado y cultivado en diferentes partes del mundo. Se produce en una variedad de sustratos lignocelulósicos como la pulpa de café, aserrín, cacao, cáscaras de maní y coco, madera, entre otros (Cudris, 2011). Se puede observar en la figura 9.

La tecnología de cultivo se ha automatizado y perfeccionado para obtener cada vez mejores cosechas; los hongos son inoculados en troncos y cosechados después de seis meses a un año (Zepeda, et. al, 2016). Si bien con los métodos modernos, ya sólo se necesitan unas pocas semanas desde la inoculación hasta la fructificación. Por ende, en condiciones controladas de cultivo se pueden duplicar y hasta triplicar los carpóforos de cada bloque sintético (Zepeda, et. al, 2016).

Los métodos de producción se basan en el uso de bloques de 1 kg de aserrines suplementados que son inoculados en la parte superior y producen cerca de dos oleadas; aunque si se utiliza mayor cantidad de sustrato se pueden obtener hasta 4 cosechas (Zepeda, et. al, 2016). Si se permite la colonización del sustrato durante 2 semanas aproximadamente, la red micelial se forma correctamente y se producen hongos con una calidad alta (Zepeda, et. al, 2016). Durante la incubación la superficie exterior del sustrato aparece blanca y plana, comprimida en la bolsa. A los 20-25 días los bloques empiezan a mostrar una topografía irregular con protuberancias, siendo los precursores a los **primordios**. En este momento empieza a disminuir la temperatura y en las puntas de las protuberancias se forman pequeñas manchas marrones presionando el plástico.

El fungicultor expone el micelio al ambiente retirando la bolsa de plástico de los bloques, se evapora el agua de la superficie y deben mantenerse en condiciones de niebla del 100% hasta que se formen la cantidad de primordios deseados. Así pues, después de la primera oleada se deben extraer los bloques y se mantienen a una temperatura entre 20 a 21°C con una humedad del 30 al 50%. Seguido a esto se sumergen en agua por 24 a 48 horas (Zepeda, et. al, 2016). Después de la inmersión de estos bloques, se reubican en el cuarto de fructificación para comenzar el nuevo ciclo de cosecha de los primeros hongos, por tanto, se necesita regar diariamente los bloques. Luego, se reinicia el ciclo de inmersión hasta que los bloques se reduzcan de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{3}$ del tamaño original y obtengan un color marrón oscuro (Zepeda, et. al, 2016). Los residuos del bloque pueden triturarse para ser reciclados y utilizados en sustratos de otras especies de hongos como *Pleurotus* spp. o *Ganoderma* spp.

Se han descrito cuatro etapas de desarrollo del hongo shiitake que se presentan a continuación:

Etapas	Descripción
I: Crecimiento del micelio	Después de la inoculación del sustrato, el micelio de color blanquecino crece hasta colonizarlo. Esta es una fase donde se da la asimilación de nutrientes y las enzimas se encargan de romper los componentes del sustrato como la celulosa, lignina o hemicelulosa con el fin de transformarlas en moléculas más simples y así puedan ser absorbidas por el micelio.
II: Formación del escudo del micelio.	Pasadas dos a cuatro semanas se empieza a formar una capa gruesa de micelio que inicialmente es de color blanco. En esta etapa, la concentración de CO ₂ en el interior es elevada.
III: Formación de ampolla.	Los grupos de los micelios se desarrollan y forman ampollas que son bultos de diferentes tamaños que se aprecian en la superficie del sustrato. El tiempo de formación varía dependiendo del sustrato, las cepas y la temperatura. Normalmente se producen a los 10 días, apareciendo más rápido a los 25°C que a 15°C.
IV: Browning y la formación de la corteza	En esta etapa el micelio se empieza a oscurecer tornándose rojizo y luego a un color marrón. El sustrato tiene textura suave y húmeda dada las acciones metabólicas del hongo.

Tabla 1. Etapas de desarrollo del hongo shiitake (Cudris, 2011).

El shiitake ha sido reconocido en Japón y China como un alimento con un valor nutricional alto, ya que es una buena fuente de proteína, potasio y zinc. Además, es una fuente rica de

polisacáridos y potenciadores del sistema inmunológico. En la medicina oriental es utilizado para tratar enfermedades del corazón, úlceras, problemas de visión, alergias, neuralgias, entre otras (Zepeda, et. al, 2016). No obstante, el shiitake ha sido utilizado en la industria farmacológica en preparaciones tales como el **Extracto Micelial (LEM)** y el **Lentinan**. Estas dos sustancias presentan propiedades antitumorales y son ampliamente utilizadas en tratamientos médicos en personas y animales, ya sea por vía oral o intravenosa (Zepeda, et. al, 2016). Estos componentes se encuentran en la pared celular y se extraen tanto del micelio como de los cuerpos fructíferos (Zepeda, et. al, 2016).

5.1.4.2 Cultivo de *P. ostreatus* (Orellanas).



Figura 10. Cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Zepeda, et. al, 2016).

Los hongos del género *Pleurotus* son más fáciles y menos costosos de cultivar, dado que presentan una alta adaptabilidad, agresividad y productividad. Su producción a nivel mundial ocupa el tercer lugar después del champiñón (*Agaricus bisporus*) y el shiitake (*Lentinula edodes*).

Estos hongos se caracterizan por ser grandes descomponedores de troncos y pueden crecer en un amplio espectro de residuos en comparación con otras especies. Crecen en la mayoría de maderas duras, paja de todos los cereales, caña de azúcar y bagazos, entre otros (Zepeda, et. al, 2016). En la naturaleza, las especies de *Pleurotus spp.* crecen sobre partes de plantas vivas o muertas, ya sea como parásito o saprófito. El micelio crece y forma el cuerpo fructífero utilizando los nutrientes a partir de los complejos lignocelulósicos (relaciones Carbono/Nitrógeno entre 50 y 500) (Zepeda, et. al, 2016).

El **valor nutricional** de estos hongos es elevado, puesto que contienen un alto nivel de proteína, fibra y minerales. Se han encontrado valores de proteína cruda digestible en el *Pleurotus ostreatus* de un 30,4%, dependiendo de las condiciones de cultivo. El contenido de grasa de *Pleurotus* se encuentra en un promedio del 2,85%. Además, en un 72% de los ácidos grasos son insaturados, siendo representado principalmente por el ácido linoléico representando un 62,94%. Por el contrario, los productos de origen animal presentan en mayor proporción ácidos grasos saturados, siendo perjudiciales para la salud (Zepeda, et. al, 2016).

El cultivo de orellanas se lleva a cabo en un sustrato leñoso-celulósico húmedo que se incuba entre 15°C a 25°C, mientras se conserva envuelto en plástico y por último se mantiene al descubierto en sitios frescos y húmedos hasta que los hongos fructifiquen. Para el crecimiento del micelio sobre el sustrato, la temperatura debe oscilar entre 15°C y 22°C presentándose una transferencia de oxígenos entre el medio y el sustrato de crecimiento (Zepeda, et. al, 2016) (Miles y Chang, 1999). Para la etapa de **fructificación** la temperatura

debe estar alrededor de 20°C y la humedad relativa entre el 85% y el 95%. La baja concentración de CO₂ en el ambiente es necesaria, ya que el ambiente debe estar aireado y necesita recibir luz al menos 12 horas diarias (Zepeda, et. al, 2016) (Miles y Chang, 1999).

5.1.4 Elaboración del sustrato

El sustrato se define como el componente que otorga las condiciones propicias gracias a los requerimientos nutricionales que le provee al ente biológico, en este caso, las orellanas y los shiitakes (Cultivo de Hongos, s.f.). Estudios han demostrado que, dependiendo de los productos que lo componen, se logra obtener mejor eficiencia biológica de setas por sustrato (García *et al.*, 2011). El mal manejo del sustrato así como la mala higiene, provoca que existan protocolos para esterilizar el sustrato ya que de esta forma se logra evitar contaminación y eliminar hongos competidores, de plagas y de enfermedades. Así pues, existen dos tipos de sustratos que se definen a continuación. Se debe tener en cuenta que los sustratos preparados y listos para empezar el ciclo de crecimiento de los hongos, se introducen en sacos de plástico.

El proceso de elaboración de estos sustratos se divide en dos fases. La primera de fermentación y la segunda de pasteurización. En la primera, se eligen las materias primas que van a componer el sustrato. Estos son materiales lignocelulósicos y proteicos como por ejemplo las pajas de cereales (trigo, avena, centeno, maíz, cebada, etc), pulpa de café, bagazo de caña, residuos del plátano, alfalfa deshidratada, aserrín de madera, yeso, cal residuos de algodón, soja, de agave y aceite de palma, entre otros. Posteriormente, se cortan las materias primas con picadoras, trituradoras o manualmente hasta obtener el tamaño deseado (2 a 4 cm), se humectan dichas materias primas (alrededor de 12 horas), se mezclan (pueden mezclarse varias materias) y se empieza la fase de pasteurización bajo condiciones de temperatura (25°C - 30°C) y humedad (70%) controladas. La segunda fase consta de desinfectar el sustrato para evitar la contaminación para finalizar con la inoculación del micelio (Palencia, 2015).

Las dos fases descritas previamente se realizan en laboratorios especializados germinando las esporas en placas con agar-maltosa u otros medios de cultivo.

5.1.5. Eficiencia biológica (EB)

La eficiencia biológica es un parámetro que se utiliza para poder medir el rendimiento de los sustratos (Merlo, et. al, 2005). Se encuentra en función del peso fresco de hongos por cada parte del peso seco del sustrato como se observa a continuación:

$$Eficiencia\ biológica\ (EB) = \frac{Peso\ del\ hongo\ fresco\ (PHF)}{Peso\ del\ sustrato\ seco\ (PSS)} \times 100$$

Ecuación 1. Cálculo de la eficiencia biológica (Merlo, et. al, 2005)

5.2. ¿Qué es la automatización y por qué la importancia de la misma?

Las nuevas tecnologías han supuesto una revolución en muchos campos de nuestra vida. Así pues, la automatización de los procesos ayuda a mejorar e incrementar la eficiencia de los recursos, aumentar la calidad de los productos y la rentabilidad de los mismos. Beneficios como estos son fundamentales en países en vía de desarrollo como Colombia, ya que los puede integrar en diferentes sectores como el agrícola, siendo uno de los

principales generadores de empleo y representando una de las principales actividades económicas de la población (Castro, et al., 2016).

Por consiguiente, un sistema de control se puede definir como una interconexión de elementos que forman una configuración denominada **sistema o planta**, de tal forma que la modificación resultante sea capaz de controlarse por sí mismo (Hernández Gaviño, 2010). A un sistema se le aplica una señal $r(t)$ a manera de entrada para obtener una respuesta o salida $y(t)$ representada mediante bloques como se observa a continuación:



Figura 11. La salida del sistema se debe a la interacción de entrada del proceso. Elaborado por autor. Adaptado de (Hernández Gaviño, 2010).

El vínculo de entrada-salida se da por una relación de causa y efecto con el sistema, por lo que la planta por controlar relaciona la salida con la entrada. Dado esto, se conocen diferentes tipos de entradas donde las más conocidas son **escalón, rampa e impulso** (Hernández Gaviño, 2010).

Los sistemas de control se pueden clasificar en sistemas de lazo abierto (no automáticos) o sistemas de lazo cerrado (retroalimentados o automáticos) (Dorf, Bishop, Canto, Canto, & Dormido, 2005). El sistema de control de **lazo abierto**, es cuando la acción de control es independiente de la salida. Este tipo de sistemas tienen un actuador o regulador para tener la respuesta deseada (Dorf, Bishop, Canto, Canto, & Dormido, 2005). En cambio, en los sistemas de control de **lazo cerrado** la acción de control depende de la salida. Estos sistemas utilizan sensores que identifican la respuesta real para compararla con una referencia (entrada). Por eso, se denominan *sistemas de retroalimentación* (Dorf, Bishop, Canto, Canto, & Dormido, 2005).

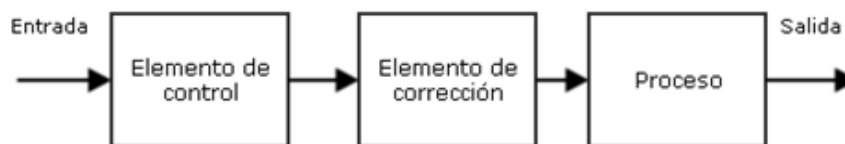


Figura 12. Sistema de control de lazo abierto. Elaborado por autor. Adaptado de (Hernández Gaviño, 2010).

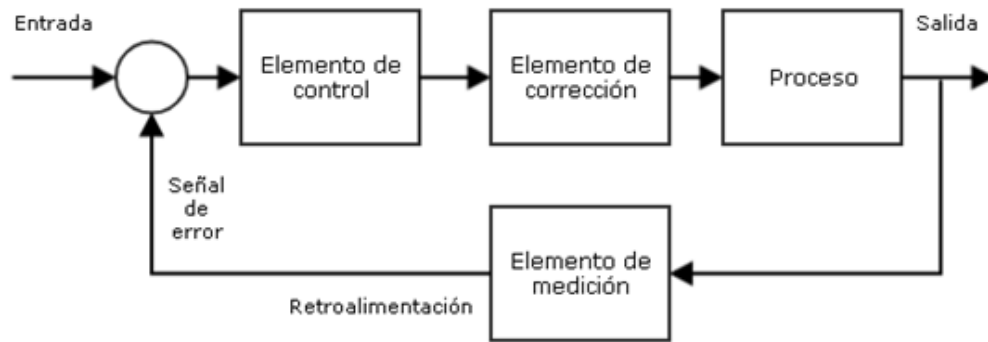


Figura 13. Sistema de control de lazo cerrado. Elaborado por autor. Adaptado de (Hernández Gaviño, 2010).

A continuación se definen los componentes fundamentales del sistema de control siendo los sensores, los actuadores y el microcontrolador.

5.2.1. Sensores

Un **sensor** es un dispositivo eléctrico y/o mecánico encargado de convertir magnitudes físicas (luz, magnetismo, presión, humedad, etc) en valores medibles de dicha magnitud que se transfieren al sistema de control (Areny, 2004). Existen diferentes forma de clasificar los sensores, ya sea por el tipo de salida que proporcionan (analógicos, binarios y digitales). Según su estructura interna, siendo activos o pasivos. También según los parámetros que sean capaces de detectar (mecánicos, ambientales, químicos, etc) (Areny, 2004).

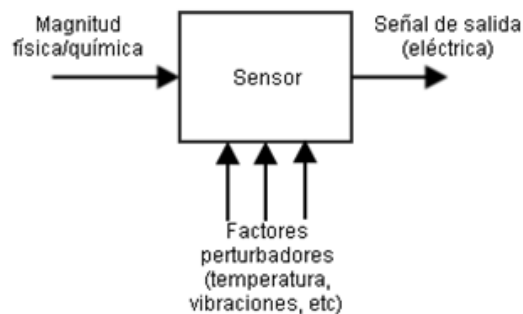


Figura 14. Principio de funcionamiento de un sensor. (Anaya & Coronado, 2019).
Adaptado de (Areny, 2004).

A continuación se describen las variables y los sensores que requiere el sistema para captar los datos:

5.2.1.1. Sensor de temperatura y humedad relativa (DHT22):

Para entender el funcionamiento del sensor es necesario que se definan las variables a evaluar, de modo que el sensor sea idóneo para realizar las mediciones de las magnitudes. Así pues, la **temperatura** se define como una magnitud física que se encarga de reflejar la cantidad de calor que posee ya sea un cuerpo, un objeto el ambiente. Se relaciona con la energía interior de los sistemas termodinámicos conforme al movimiento de sus partículas, así pues se cuantifica la actividad de las moléculas de la materia y a mayor energía, mayor temperatura (Stull, 2011).

Asimismo, la **humedad relativa** se entiende como la relación entre la presión parcial del vapor de agua y la presión de vapor de equilibrio del agua a una temperatura dada,

observándose en la **ecuación 2**. La humedad relativa depende de la temperatura y la presión del sistema de interés. La misma cantidad de vapor de agua produce una mayor humedad relativa en el aire frío que en el aire caliente (Stull, 2011).

$$\text{Humedad relativa (RH)}: \frac{\text{gramos de vapor de agua presente (g/m}^3 \text{)}}{\text{gramos de vapor de agua en saturación (g/m}^3 \text{)}} \times 100$$

Ecuación 2. Cálculo de la humedad relativa (Stull, 2011).

Para la medición de las variables anteriores se utiliza el sensor DHT22 que mide la temperatura y la humedad relativa mediante un sensor capacitivo de polímero y un termistor para medir el aire circundante. Para la comunicación con el microcontrolador utiliza un protocolo de comunicación similar al 1-Wire de Dallas y sólo requiere un pin de datos. (Bogdan, 2016). Este sensor tiene 4 pines como se observa a continuación:

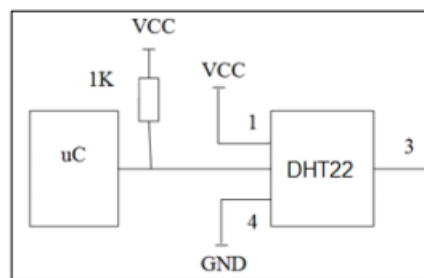


Figura 15. Sensor DHT22. a. Pin 1: VCC - 5V; b. Pin 2: Datos; c. Pin 3: Vacío; d. Pin 4: Tierra (Bogdan, 2016).

5.2.1.2. Sensor de humedad del suelo (YL-69).

La humedad del suelo o sustrato se conoce como la cantidad de agua por volumen de tierra que existe en un terreno, en este caso un sustrato. Las mediciones tradicionales se realizan mediante técnica gravimétrica, en la cual se pesa una muestra de tierra antes y después del secado (Rawal, 2017). Sin embargo, el sensor YL-69 basa su medición aplicando una pequeña tensión entre los dos terminales de la sonda, en el cual la corriente que pasa depende básicamente de la resistencia que genera el sustrato. El módulo YL-38 que se encuentra integrado contiene un LM393 que se encarga de comparar entre los dos terminales (Rawal, 2017).

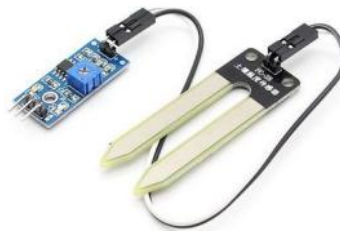


Figura 16. a) YL-69 y módulo YL-38 (Rawal, 2017).

5.2.1.3. Sensor de intensidad de luz LDR

Un LDR (Ligh-Dependent Resistor) es un dispositivo en el cual la resistencia varía en función de la cantidad de luz que reciba (Bawa *et al.*, 2013). Está conformado por un semiconductor y cuando la luz incide sobre este, los fotones son absorbidos y los electrones pasan a la banda de conducción disminuyendo así la resistencia del componente. Los

valores típicos varían entre 1 MOhm cuando se encuentran totalmente oscuros o entre 50-100 Ohm cuando la luz es brillante (Bawa *et al.*, 2013).



Figura 16. b) Módulo Sensor LDR (Bawa *et al.*, 2013).

Este módulo posee 2 salidas, una analógica que debes conectar a una entrada analógica y así utilizar el conversor ADC. La salida digital posee solo 2 estados: activo/apagado, el cambio de un estado a otro depende del umbral que se fije con el potenciómetro del módulo (Bawa y otros, 2013).

5.2.1.4 Sensor de ultrasonido HC-SR04

El sensor de ultrasonido HC-SR04 mide distancias por ultrasonido en un rango de 2 a 450 cm detectando así objetos que se encuentren en esas proximidades. Cuenta con una frecuencia de trabajo de 40 KHz, una duración mínima del pulso de disparo de 10 μ S, una duración del pulso eco de salida de 100-25000 μ S y un tiempo mínimo de respuesta de 20 ms (Mactronica, s.f.).



Figura 17. Sensor ultrasonido HR-SR04 (Mactronica, s.f.).

5.2.2. Actuadores

Considerando lo anterior, luego de que se capte la información a través del sensor, se debe realizar la acción por medio de un **actuador** que es un dispositivo mecánico cuya función es proporcionar la fuerza para mover o actuar otro dispositivo mecánico (Areny, 2004). La fuerza proviene de tres fuentes como la presión neumática, hidráulica y/o motriz eléctrica (Areny, 2004). A continuación se enumeran los actuadores a utilizar:

5.2.2.1. Resistencia térmica

Este componente será utilizado para el sistema de calefacción el dispositivo y se encarga de convertir energía eléctrica en calor. La gran mayoría de estas resistencias son fabricadas a partir de Níquel (80%) y Cromo (20%), dado que esta aleación soporta temperaturas muy altas, es resistivo, resistente a los impactos y es inoxidable (Cruz & Vargas, 2018).



Figura 18. Resistencia térmica o de calefacción (Efinox, s.f.).

5.2.2.2. Humidificador ultrasónico

El humidificador ultrasónico es un dispositivo capaz de generar fricción en las moléculas de agua provocando la evaporación del agua y su difusión gracias a una placa metálica, la cual vibra a una frecuencia ultrasónica rompiendo dichas moléculas. Como características se encuentran que no se calienta por lo que el agua evaporada sale a temperatura ambiente, la columna de vapor es homogénea, es eficiente y de bajo costo (Humidificador.org, s.f.).



Figura 19. Humidificador ultrasónico 24V (Humidificador.org, s.f.).

5.2.2.3. Tiras LED

Las luces LED pueden definirse a sí mismas como: “Diodos emisores de luz”. Estos son componentes optoelectrónicos pasivos fabricados con un material semiconductor. Al ser optoelectrónicos son capaces de transformar la energía eléctrica en luz, emitiendo una radiación cuando circula una corriente eléctrica a través de ellos (Komine & Nakagawa, 2004). Su funcionamiento está ligado al efecto de la luminiscencia, de ahí, la unión de dos terminales “p-n” (ánodo y cátodo) que caracterizan a un LED como se observa en la figura 20. Los electrones circulan en un mismo sentido, siendo de ánodo (P) a cátodo (N) y realizando la *recombinación de electrones* que tiene como resultado la emisión de energía en forma de fotones (Komine & Nakagawa, 2004).

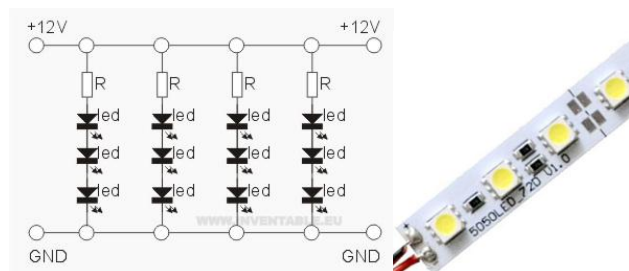


Figura 20. Tiras LED (Komine & Nakagawa, 2004).

5.2.2.4. Ventiladores

Un ventilador se define como una máquina rotativa que se encarga de poner el aire, o un gas, en movimiento. Se puede entender como una turbomáquina que transmite energía para así poder generar la presión necesaria con la que mantener un flujo continuo de aire. Sus partes son principalmente un motor de accionamiento, generalmente eléctrico, sus dispositivos de control internos: arranque, regulación de velocidad, conmutación de velocidad, etc. A su vez cuenta con un propulsor giratorio en contacto con el aire, al que le transmite energía (Yarke, 2005).

Los ventiladores se pueden clasificar de diferentes maneras, sin embargo, la más conocida es según la trayectoria del aire. En esta categoría se encuentran los ventiladores

centrífugos, axiales, transversales, helicocentrífugos, entre otros. En la figura 21, se puede observar un ventilador centrífugo, en el cual la trayectoria del aire sigue en una dirección axial a la entrada y paralela a un plano radial a la salida (Yarke, 2005).

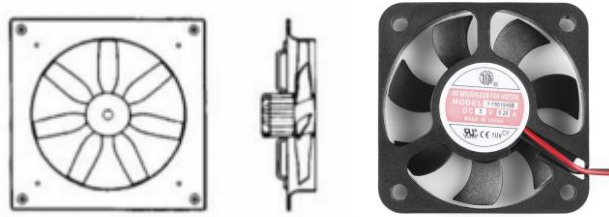


Figura 21. a. Ventilador SparkFun 5V (BricoGeek, s.f.).



Figura 21. b. Ventilador turbo 12V (Mactronica, s.f.).

5.2.2.5.OLED

El módulo OLED (Organic Light Emitting Diode) o diodo orgánico de emisión de luz es una pantalla o display que se caracteriza por tener una capa hecha de material orgánico (carbono más otras sustancias) intercalada entre dos electrodos que, cuando se les suministra energía eléctrica, emiten luz. Los píxeles se encienden independientemente los unos de los otros por lo que no requieren retroiluminación (backlight en inglés) adicional como lo hacen las pantallas LCD. En la figura 22 se encuentra una OLED de 0.91 pulgadas 128x32. (Digital citizen, 2018).



Figura 22. Módulo OLED 0.91" 128x32 (Zamux, s.f.).

5.2.2.6 ESP32 WiFi Bluetooth

El módulo de desarrollo ESP32 WiFi Bluetooth es un SoC (System on Chip) de la compañía Espressif que integra un procesador de 32 bits, una memoria RAM de 520 KB y un procesador de 240 MHz de doble núcleo. Cuenta con capacidades para conectarse a WiFi y Bluetooth a través de sus interfaces SPI / SDIO o I2C / UART. (Espressif, s.f.)



Figura 23. ESP32 WiFi Bluetooth (Prometec, s.f.).

5.3. ¿Para qué es necesario el uso de un microcontrolador (MCU)?

No obstante, para poder sensor y actuar se puede utilizar un **microprocesador**, dispositivo programado para hacer una tarea general (Raspberry Pi, ESP32) o un **microcontrolador** diseñado para realizar una tarea en específico (Arduino). La diferencia entre ambos reside en que el primero necesita de varias capas impresas que logren la interconexión entre la red de circuitos y el segundo solo hace uso de una capa de circuito impreso, por lo que su implementación podría considerarse más sencilla. Añadido a esto, el primer es un sistema abierto y el segundo es un sistema cerrado, esto significa que los microprocesadores disponen de líneas o pines externos accesibles al diseñador, los cuales conectan el hardware exterior (memoria, módulos de entrada y salida) con los buses de dirección, datos y control en el microprocesador, mientras que los microcontroladores no permiten este tipo de accesos. Finalmente, el microcontrolador genera menos ruido ya que todos sus componentes se integran dentro de esta tarjeta por lo que es muy útil en cualquier tipo de aplicación de adquisición de señales (Villamil Gonzalez, 2016). La nueva generación de Arduino así como Raspberry Pi cuentan con componentes integrados de bluetooth, WiFi, interfaces HDMI y USB (Arduino, s.f.) (Huertas Mediana, 2016).

5.3.1 Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre y se basa en los microcontroladores ATMEL AVR, siendo el ATmega328 el más utilizado en formato DIP y SMD. Se encuentra constituida por una placa que contiene el microcontrolador, puertos de entrada y salida. A su vez, el entorno de desarrollo es fácil de usar y su lenguaje nativo es el C (Arduino, s.f.).

5.3.1.1 Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es un microcontrolador basado en el ATmega2560. Este contiene 54 entradas y salidas digitales (15 pueden ser utilizadas como salidas PWM), un oscilador de 16 MHz, conexión USB, conector Jack para poder, etc. Como se puede observar en la figura 23 (Arduino, s.f.).

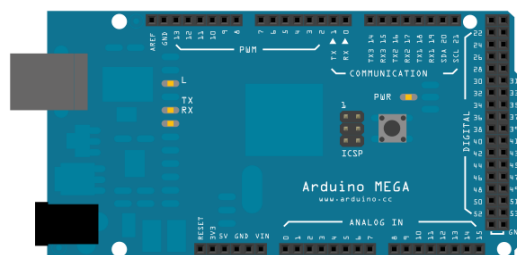


Figura 24. Arduino MEGA 2560 (Arduino, s.f.).

5.4. Clasificación acciones de control: ON-OFF y ON-OFF con histéresis.

La forma en la cual el controlador automático ejerce la señal de control se denomina “Acción de Control”. Estos comparan el valor real de la salida de la planta con la entrada de referencia para así determinar la desviación con la que el controlador debe producir la señal de control y así, reducir la desviación (DORF, 2005). Existen diferentes acciones de control que se pueden implementar en un sistema, a continuación se detalla la acción de control ON-OFF y ON-OFF con histéresis.

5.4.1. Acción de control ON-OFF (Encendido - Apagado)

La acción de control ON-OFF sólo posee dos posiciones fijas que son la de **encendido** y **apagado**. Este tipo de control es bastante simple y económico, por lo tanto, se han usado de manera extendida en sistemas de control industriales y domésticos (DORF, 2005).

Si se tiene una señal de salida del controlador $u(t)$ y una señal de error $e(t)$, en el control de dos posiciones, la señal de salida $u(t)$ se mantiene en un valor máximo o en un valor mínimo dependiendo si la señal de error es positiva o negativa. Por tanto;

$$u(t) = U_1 ; \text{ para } e(t) > 0$$

$$u(t) = U_2 ; \text{ para } e(t) < 0$$

Ecuación 3. Comportamiento de un sistema ON-OFF

en donde U_1 y U_2 son constante. Por lo general, el valor mínimo de U_2 es cero o menos U_1 .

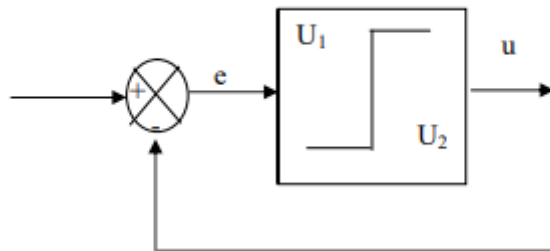


Figura 25. Diagrama de bloques acción de control ON-OFF en función del error del sistema (DORF, 2005).

Por ejemplo, si se toma un sistema en el cual se deba encender o apagar un calentador dependiendo de un umbral de temperatura se comportaría en un ON-OFF como aparece en la figura 26. Dado que la temperatura debe cruzar un valor de referencia para cambiar el estado de la salida, esta temperatura se encuentra oscilando continuamente (DORF, 2005). Para evitar que los actuadores se desgasten con el tiempo por el encendido y apagado continuo, se debe establecer un diferencial o histéresis como se explica posteriormente.

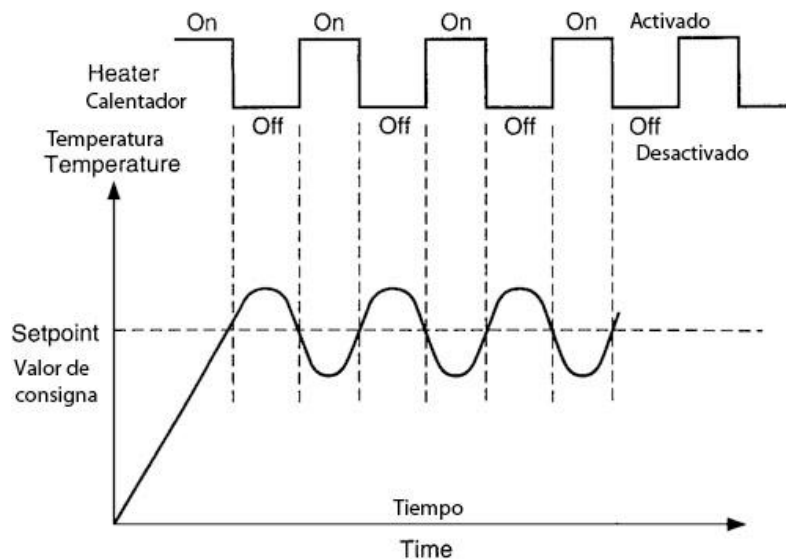


Figura 26. Acción de control de temperatura ON-OFF (DORF, 2005).

5.4.2. Acción de control ON-OFF (Encendido-Apagado) con histéresis.

La histéresis se define como la diferencia entre los tiempos de apagado y encendido del controlador. Al agregar un proceso de histéresis al sistema se presenta una oposición al experimentarse cualquier cambio en el sistema. Esta función requiere que la temperatura exceda el valor de consigna en una cierta cantidad (la mitad del diferencial) antes que la salida se desconecte nuevamente (DORF, 2005). Esto evitará vibraciones de la salida si el ruido es menor que la histéresis. Dependiendo de la cantidad de histéresis existente se determina la variación mínima de la temperatura posible. Así pues, la respuesta se puede observar en la figura 27.

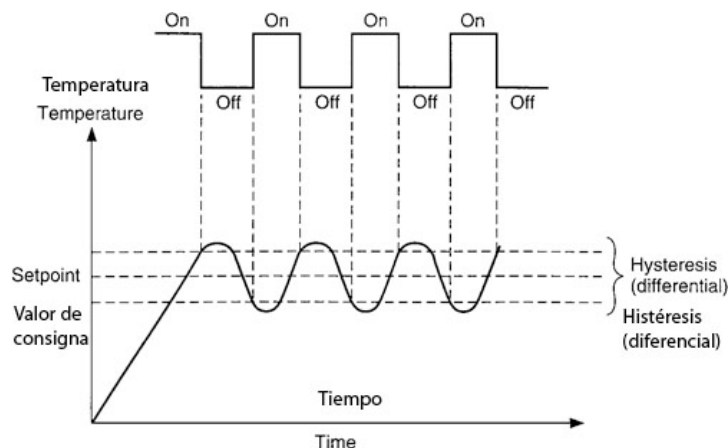


Figura 27. Acción de control de temperatura ON-OFF con histéresis (DORF, 2005).

5.5. La Función de Transferencia

La función de transferencia se define como el cociente de la transformada de Laplace existente entre la salida (función de respuesta del sistema) y la transformada de Laplace de

la entrada, cuando las condiciones iniciales son cero, es decir, cuando el sistema está en reposo (DORF, 2005).



Figura 28. Representación de la ganancia de un sistema (DORF, 2005).

Para el sistema de la figura 28, la salida $Y(s)$ es producto de la ganancia $G(s)$ y la entrada $U(s)$, lo que implica que $Y(s) = G(s) U(s)$; la ganancia de sistema es entonces como se observa en la Ec. 4:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Ecuación 4. Función de transferencia de un sistema. Adaptado de (DORF, 2005).

Es decir, si el sistema viene dado por la ecuación diferencial:

$$a_n y^n(t) + a_{n-1} y^{n-1}(t) + \dots + a_1 y'(t) + a_0 y(t) = b_m u^m(t) + b_{m-1} u^{m-1}(t) + \dots + b_1 u'(t) + b_0 u(t)$$

Ecuación 5. Ecuación diferencial del sistema

Así pues, la función de transferencia será:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{N(s)}{D(s)} \\ &= \frac{\sum_{i=0}^m b_i s^i}{\sum_{j=0}^n a_j s^j} \end{aligned}$$

Ecuación 6. Función de transferencia, transformada de Laplace (DORF, 2005).

- Los sistemas de *orden no mínimo* tienen raíces comunes a $N(s)$ o $Y(s)$ y $D(s)$ o $U(s)$; la función de transferencia debe escribirse de forma simplificada, y es de orden inferior a n .
- Las funciones de transferencia *propias* tienen numerador de orden menor o igual al del denominador (DORF, 2005).
- Las raíces del denominador y del numerador, se denominan respectivamente **polos** y **ceros**.
- El orden del sistema corresponde con el grado del polinomio del denominador $D(s)$. En la ecuación 7 se observa un sistema de primer orden, mientras que en la ecuación 8 se evidencia un sistema de segundo orden.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Ecuación 7. Sistema de primer orden.

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Ecuación 8. Sistema de segundo orden.

Ventajas de la Función de Transferencia - $G(s)$

- Se considera como una representación compacta de un sistema lineal como cociente de polinomios en s .
- Predicción de la forma de la señal sin necesidad de resolver la ecuación diferencial.
- Se puede interpretar de manera inmediata en la frecuencia: $s=j\omega$ (DORF, 2005).

6. MARCO LEGAL

Objetivos del Desarrollo Sostenible: En 2016, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció 17 objetivos dentro de los cuales 5 se pueden relacionar directamente con el presente trabajo. Estos son i) *hambre cero* en el cual se promueve el desarrollo de soluciones que erradiquen el hambre y la pobreza, ii) *buena salud y bienestar* el cual busca asegurar una vida saludable para todas las edades, iii) *ciudades y comunidades sostenibles* el cual pretende ofrecer acceso a servicios básicos como energía, vivienda, transporte, entre otros, iv) *producción y consumo responsable* por el cual se busca concientizar a la población y v) *acción climática* que propone medidas urgentes para atacar el cambio climático y sus consecuencias (United Nations, 2015).

Constitución Política de 1991: Establece en el Artículo 44 el derecho a la alimentación equilibrada como un derecho fundamental de los niños. En el Artículo 43 y en el Artículo 46 fija que se les debe garantizar un subsidio alimentario a mujeres durante el embarazo y el post parto así como a las personas de la tercera edad en estado de indigencia. Igualmente, en cuanto a la oferta y la producción agrícola se establecen los deberes del Estado en esta materia (Constitución Política de Colombia, 1991).

Política Nacional de Producción más limpia: Esta política sometida al Consejo Nacional Ambiental hace particular énfasis en la solución de la problemática ambiental de los sectores productivos tales como el cambio climático; el uso de automóviles y transportes de carga; el uso de pesticidas y fertilizantes y, por último, los usos que se le dan al agua. Esencialmente, la política busca “prevenir la contaminación en su origen, en lugar de tratarla una vez generada, con resultados significativos para la construcción de las posibilidades reales de sostenibilidad y competitividad sectorial” (Ministerio del Medio Ambiente, 1997).

Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (PSAN): El documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) Social 113 de 2008 propone construir ejes políticos desde los medios económicos, el bienestar y la salud basados en la disponibilidad de los alimentos, el acceso, el consumo, el aprovechamiento y la calidad e inocuidad de los alimentos y busca involucrar al Estado, a las familias y a la sociedad civil en general. Asimismo, establece las siguientes líneas de acción, i) suministro de alimentos y desarrollo de mercados, ii) impulso a las formas asociativas y acceso a factores productivo, iii) garantía de acceso a los Alimentos, iv) protección de la salud y la nutrición, v) investigación científica y tecnológica y vi) fortalecimiento de capacidades humanas (CONPES, 2008).

Política Nacional Fitosanitaria y de inocuidad para las cadenas de frutas y otros vegetales: el documento CONPES Social 113 de 2008 establece los lineamientos para mejorar las condiciones fitosanitarias y la inocuidad de la producción hortofrutícola con el fin de proteger la salud y vida de las personas, aumentar la competitividad y fortalecer la capacidad para obtener la admisibilidad de los productos en los mercados internacionales (CONPES, 2008).

Proyecto de Ley 128 del 2010: Por la cual se establece la agricultura urbana como política pública de mejoramiento de calidad de vida, se promueve la disminución de la desnutrición y se dictan otras disposiciones. Esta ley, además, determina que la agricultura urbana es “la

práctica agrícola de producción limpia, ecológica y sostenible del cultivo de plantas alimenticias y medicinales, aromáticas u ornamentales, dentro de las áreas urbanas y/o de expansión urbana de los municipios y distritos, destinados a proveer de alimentos y productos saludables a la población humana.” (Congreso de la República de Colombia, 2010).

Decreto 284 de 2015: Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos - RAEE y se dictan otras disposiciones. Este decreto pretende abordar la prevención de la generación de los residuos otorgando una regulación óptima y un manejo ambiental adecuado (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

Acuerdo 605 del 2015: Este acuerdo fue diseñado por la Secretaría Distrital de Ambiente junto con el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis (JBB), con el apoyo de las Secretarías de Integración social, Desarrollo Económico, Gobierno y Salud, en el cual se formulan los lineamientos para institucionalizar el programa de agricultura urbana y periurbana agroecológica en la ciudad de Bogotá. Además, manifiesta que estas prácticas contribuyen al impacto del cambio climático, promoviendo cultivos limpios y alimentos sanos para el autoconsumo y, por qué no, de la comercialización de los productos sobrantes (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2015).

Planes de Desarrollo con proyectos de Agricultura Urbana en el Distrito Capital: Los proyectos de Agricultura Urbana y Periurbana 319 (2004-2011), 863 (2012 -2015) y 1119 (2016-2020) liderados por el JBB se encuentran en el marco del Plan de Desarrollo "Bogotá Mejor para todos" y su enfoque está dirigido a la sostenibilidad ambiental basada en la eficiencia energética. El JBB también se compromete a ofrecer asesorías técnicas y capacitaciones a cualquier ciudadano que lo solicite con el fin de promover las prácticas de agricultura urbana y mejorar la cobertura vegetal en la ciudad (Herrera et al., 2017), (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018).

7. LEVANTAMIENTO DE REQUERIMIENTOS

A continuación se realiza la identificación y evaluación de los requerimientos de ingeniería mediante la aplicación de las preguntas: ¿Qué necesita el cliente?, ¿Qué necesitan los hongos y el diseño? y respondiendo bajo la pregunta ¿Cómo voy a lograr satisfacer estas necesidades?

7.1. Requerimientos funcionales del cliente:

Ítem	Requerimientos del cliente
1	Los hongos comestibles deben tener un alto valor nutricional, un alto precio y ser difíciles de conseguir en el mercado.
2	Los hongos comestibles deben tener buen sabor, color, olor y sean inocuos para su consumo.
3	Ubicación en un lugar reservado al almacenamiento de alimentos.
4	Garantizar la operación del sistema durante las fases críticas.
5	Sistema de control que mantenga las condiciones favorables para el desarrollo y crecimiento del hongo comestible.
6	Fácil manejo y mantenimiento.
7	Amigable con el medio ambiente.
8	Un diseño que brinde armonía con el entorno, que sea resistente al ambiente, a perturbaciones mecánicas, vibraciones y al deterioro.
9	Alta rentabilidad y productividad.

Tabla 2. Requerimientos funcionales del cliente.

7.2. Requerimientos funcionales de los hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*):

Ítem	Requerimientos técnicos de los hongos comestibles (<i>Lentinula spp.</i> y <i>Pleurotus spp.</i>)
10	Los sustratos deben ser pasteurizados antes de la siembra para así evitar la contaminación.
11	Para la preparación del sustrato, se deben garantizar las condiciones que necesita el hongo para que pueda absorber los nutrientes y asegurar su crecimiento y desarrollo.
12	Se debe realizar la siembra hasta que el sustrato esté frío o al menos a 25°C, ya que a mayor temperatura el micelio puede morir.
13	Durante la incubación se debe garantizar la humedad relativa entre el 90 y el 100%, la temperatura del sustrato no debe exceder los 35°C y se debe manejar en condiciones de oscuridad.
14	Para la formación de primordios (primer estadio de desarrollo del hongo) se debe garantizar una humedad relativa del 95%, la temperatura ambiente entre los 13 a los 15°C. Se deben utilizar 2000 lux/hora durante 12 horas al día mediante tubos fluorescentes.

15	Para la cosecha se necesita de una humedad relativa entre el 85 a 92%, la temperatura ambiente entre 15 a 18°C con una iluminación de 2000 luz/hora mediante tubos fluorescentes.
16	El riego se debe realizar de forma manual o aspersión una o dos veces por día para evitar que el sustrato se seque.
17	Ambiente limpio de contaminación por hongos y microorganismos no deseados.

Tabla 3. Requerimientos funcionales de los hongos comestibles.

7.3. Requerimientos técnicos del cliente:

Ítem	Requerimientos funcionales del cliente
1	Identificar y seleccionar los hongos comestibles por su valor nutricional, precio y su calidad superior en el mercado.
2	Asegurar las condiciones de crecimiento, desarrollo e inocuidad basándonos en referencias bibliográficas.
3	Tener en cuenta las medidas estándar que se manejan en la construcción de muebles tales como el mesón de una cocina, donde se pueda ubicar el prototipo. Identificar la proximidad a fuentes de energía de 110V o 220V.
4	Sistema de notificación y/o alerta vía WiFi/Bluetooth
5	Medir las variables físicas: temperatura ambiente, humedad relativa, humedad del sustrato, radiación y distancia del líquido al fondo del tanque. Fijar los rangos en los que se va a controlar el sistema basándonos en las condiciones de desarrollo y crecimiento del hongo. Accionar los actuadores para que ejecuten las tareas predeterminadas para mantener al sistema bajo control. Definir el dispositivo de control que se va a utilizar en el sistema.
6	Disponer de un manual de uso y mantenimiento.
7	Asegurar un uso sostenible de los recursos mediante la reutilización de los materiales y de los recursos que alimentan a los hongos.
8	Proponer un diseño bioinspirado que permita la sinergia con el entorno, disponer de compartimentos herméticos que protejan los sistemas de monitoreo y control.
9	El costo del dispositivo debe ser asequible para el público mientras se garantiza que los hongos comestibles sean productos de lujo (premium).

Tabla 4. Requerimientos técnicos del cliente.

7.4. Requerimientos técnicos de los hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*):

Ítem	Requerimientos técnicos de los hongos comestibles (<i>Lentinula spp.</i> y <i>Pleurotus spp.</i>)
10	Se debe realizar un tratamiento térmico donde la temperatura no supere los 60°C y se mantenga durante 12 horas.
11	Según revisión bibliográfica, se deben garantizar los sustratos que se necesiten según la especie. Se pueden utilizar una variedad de sustratos lignocelulósicos

	como la pulpa de café, aserrín, cacao, cáscaras de maní y coco, madera, entre otros. En este proyecto se utiliza residuos de eucalipto y alfalfa peletizada.
12	Hacer mediciones de temperatura periódicas para poder asegurar que el sustrato se encuentre frío.
13	Garantizar con el sistema de control las condiciones necesarias para la incubación.
14	Garantizar con el sistema de control las condiciones necesarias para la formación de primordios.
15	Garantizar con el sistema de control las condiciones necesarias para la cosecha.
16	Adecuar el sistema de riego con el sistema de control para brindarle la cantidad de humedad relativa que necesitan los hongos.
17	Hacer la desinfección necesaria para evitar la contaminación del medio de crecimiento del hongo.

Tabla 5. Requerimientos técnicos de los hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*)

7.5. Requerimientos funcionales del diseño del prototipo funcional de huerto casero automatizado:

Ítem	Requerimientos técnicos del diseño del prototipo funcional
18	Estudio del mesón donde se va a ubicar el prototipo, sus medidas de longitud, superficie, peso y capacidad.
19	Determinar el volumen de la estructura que permita almacenar el sustrato y el número de hongos comestibles (máximo 2 sustratos, mínimo 1).
20	Adaptar el voltaje y la potencia del sistema ajustando el sistema para que funcione según las fuentes de energía eléctrica de la cocina y según requerimientos del diseño.
21	Determinar el peso del dispositivo según dimensiones y materiales.
22	Se deben medir variables físicas como temperatura ambiente, humedad relativa, humedad del sustrato, radiación y distancia del líquido al fondo del tanque.
23	Disponer de iluminación especial para favorecer el crecimiento y el desarrollo del hongo.
24	Disponer de un sistema térmico especializado que pueda favorecer al hongo comestible en sus diferentes etapas de desarrollo y crecimiento.
25	Tener en cuenta los rangos de variación (error) de los equipos electrónicos utilizados, así como sus características técnicas y ciclo de vida.
26	Asegurar que el cableado tanto como los sistemas electrónicos no sean invasivos.
27	La capacidad del tanque de agua debe mantener una reserva de agua constante para el suministro del sistema de riego.
28	Desarrollar una interfaz para establecer la comunicación del usuario con un

	sistema de alertas.
--	---------------------

Tabla 6. Requerimientos funcionales del diseño del prototipo de huerto casero de hongos comestibles.

7.6. Requerimientos técnicos del diseño del prototipo funcional de huerto casero automatizado:

Ítem	Requerimientos funcionales del diseño del prototipo funcional
18	Planos, visita técnica, requerimientos del cliente, revisión bibliográfica. El mesón estándar tienen un mínimo de ancho 60 cm y máximo 285 cm, profundidad mínima de 65 cm y máxima 67, altura mínima de 215 cm y máxima de 245 cm (Neufert, 1995). La resistencia a carga y la capacidad del mueble depende del cálculo estructural, de los materiales, las dimensiones del mesón y la estructura que soporta el mesón.
19	El sustrato mide 11 x 10 x 27 cm y junto con los hongos alcanza entre 20 cm x 20 x 13 cm (Espresso Mushroom Company. , s.f.), por lo que las dimensiones de la cámara de almacenamiento deben ser superiores a estas. Se deben tener en cuenta cuantos sustratos se van a colocar dentro de la cámara del huerto casero.
20	Medidor bifásico que soporte el voltaje ya que el voltaje en las cocinas es de 110V o 220V. Utilizar un transformador de aislamiento para pruebas del circuito. A partir de estas medidas, calcular corriente y resistencia.
21	Calcular el peso de todo el sistema mediante el cálculo del peso de los elementos del sistema, de los materiales según las dimensiones, del hongo comestible y del sustrato utilizado.
22	Revisión bibliográfica. El sensor DHT22 de temperatura y humedad relativa maneja rangos de medición entre -40°C a 80°C de temperatura y mide entre 0 a 100% de humedad, con una exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (SparkFun Electronics, s.f.). El sensor de humedad del sustrato YL38 o YL69 miden rangos entre 0 a 300: sustrato seco, 300-700: sustrato húmedo y 700-950: en el agua, dependiendo del voltaje arrojado (SparkFun Electronics, s.f.). El luxómetro BH1750 mide rangos de 0,11 a 100000 lux, una exactitud de $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$, tiene una baja influencia al espectro infrarrojo, rechazo al ruido de 50/60 Hz (luz artificial) y alta independencia del origen de la fuente de luz (luz natural, halógenos, LED, fuentes incandescentes) (Llamas, 2016). El sensor ultrasonido HC-SR04 es capaz de calcular la distancia de un objeto en un rango de 2 a 400 cm, señal de disparo: 10 μS , voltaje 5V y corriente mA (MicroKits Electrónica, s.f.).
23	Reconocer mediante bibliografía los espectros de luz y las lámparas que necesita cada especie para el correcto crecimiento. Se recomienda utilizar luces que se encuentran en el rango del azul.
24	Se debe disponer de un elemento calefactor que proporcione la temperatura entre 23 a 25°C.
25	Utilizar equipos que presenten una buena precisión y exactitud con rangos de precios asequibles como el DHT22 que presenta una precisión en la temperatura

	de ± 0.5 °C con una resolución de 0.1. Además la precisión de la humedad es de un 2% (SparkFun Electronics, s.f.).
26	Revisión de los datasheets.
27	Tener en cuenta el tanque y su capacidad basándonos en las características físicas del espacio físico y las dimensiones del prototipo.
28	El módulo ESP32 WiFi Bluetooth permite el envío de notificaciones al usuario por celular u ordenador (Espressif, s.f.).

Tabla 7. Requerimientos técnicos del diseño del prototipo de huerto casero de hongos comestibles.

7.7. Matriz QDF

A continuación, la matriz de Despliegue de la Función Calidad (QDF, por sus siglas en inglés) nos permite certificar que los requerimientos del usuario se revelen en las características técnicas lo que, finalmente, se traduce en la satisfacción del cliente (Yacuzzi, E., *et al.*, 2003).

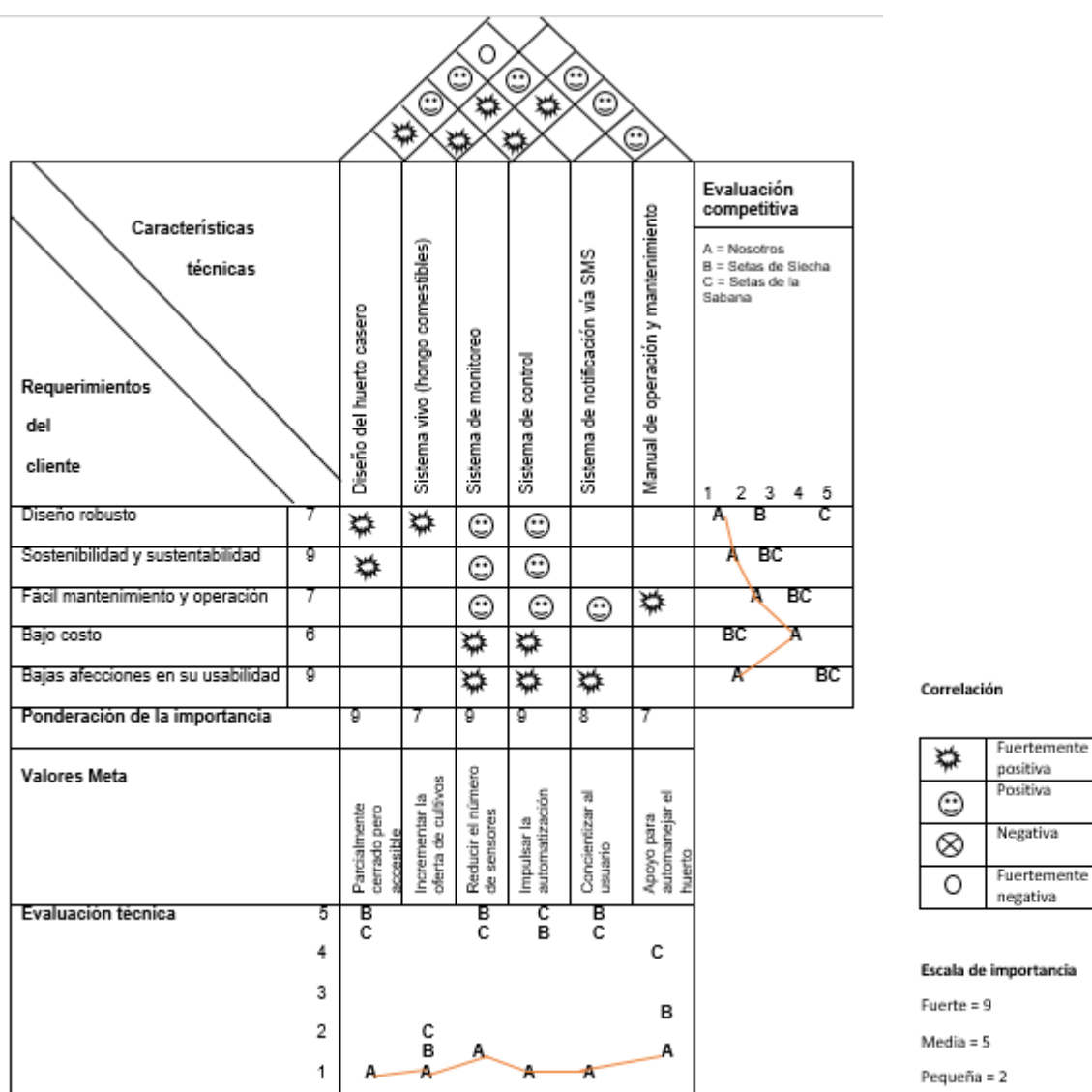


Figura 29. Matriz QDF del producto del trabajo de grado
(Anaya & Coronado, 2019).

8. METODOLOGÍA

En la figura 30 se puede evidenciar un diagrama general de la metodología de trabajo a desarrollar para el cumplimiento de los objetivos propuestos. La metodología se desglosa detalladamente en cada fase de este aparte.

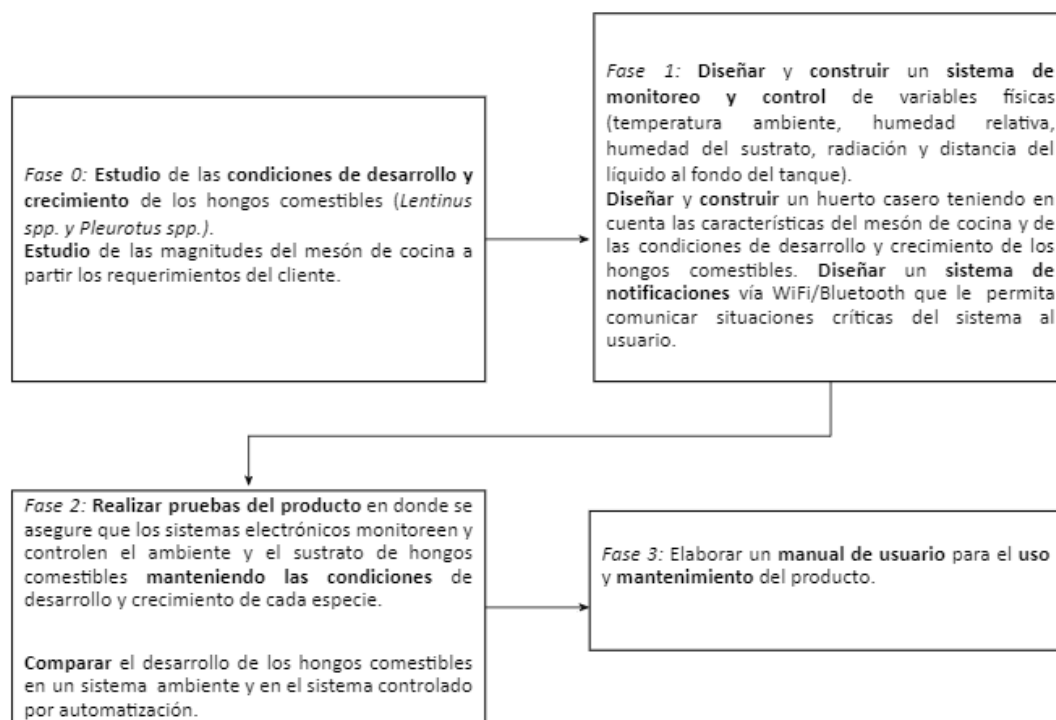


Figura 30. Diagrama de flujo de la metodología (Anaya & Coronado, 2019).

8.1. Fase 0: Estudio de las condiciones que favorecen el crecimiento y desarrollo de los hongos y del lugar de ejecución dentro de la vivienda.

El primer paso consistió en identificar las variables físicas que favorecen las condiciones para el crecimiento y desarrollo del hongo comestible. En efecto, se debió hacer una revisión bibliográfica de las especies que se planeaban cultivar ya que cada una tienen requerimientos y condiciones específicas. Así pues, se recopilaron los valores de temperatura, humedad relativa, humedad ambiente, radiación y cantidad de agua que necesita el hongo. A partir de esta información, se realizó el diseño del sistema de control. Simultáneamente, se debieron medir las dimensiones del espacio donde se planeaba implementar el dispositivo. Es imperativo para el sistema identificar las instalaciones de la red local de suministro eléctrico de la cocina. Esto con el fin de establecer los requerimientos técnicos del prototipo de huerto casero.

8.1.1. Cultivo de los hongos.

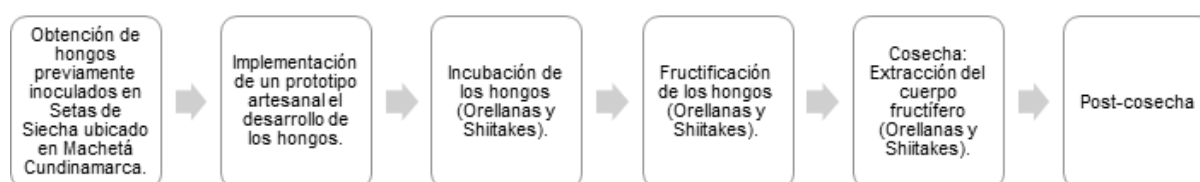


Figura 31. Metodología del cultivo de hongos (Anaya & Coronado).

8.1.1.1 Obtención de los hongos

Los hongos (shiitake y orellanas) fueron obtenidos en la empresa Setas de Siecha-Finca Fungi Flora, ubicados en Machetá (Cundinamarca) (Setas de Siecha, 2019). Se le realizó una entrevista a Felipe Vengoechea, fungicultor de la finca e indicó que la preparación de estos hongos se realizó de la siguiente manera:

- **Selección, formulación y adecuación de sustratos para *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*:** Los materiales que se utilizaron para la preparación del sustrato fueron el aserrín de eucalipto, salvado y alfalfa peletizada. Seguido a esto, se empaclaron en una bolsa de plástico con un filtro y fue ingresada a un autoclave como se observa en la figura 32 a 80°C durante el tiempo que sea necesario, dependiendo de la cantidad de sustrato. Es un promedio de 2h por cada 10 kg de sustrato.



Figura 32. Autoclave ubicado en Setas de Siecha en Machetá-Cundinamarca (Anaya & Coronado, 2019).

- **Inoculación de *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes* en el sustrato:** En este paso los sustratos se inocularon con la semilla del hongo en una cabina de flujo laminar que se puede observar en la figura 33. para evitar la contaminación del sustrato y el micelio pueda colonizar toda el área. Seguido a esto se llevó al cuarto de incubación donde la orellana tardó un promedio de un mes a mes y medio. En cambio, el shiitake duró aproximadamente 2 meses. Luego de esto, se lleva al cuarto de fructificación como se observa en la figura 34.



Figura 33. Cabina de flujo laminar ubicada en Setas de Siecha en Machetá-Cundinamarca (Anaya & Coronado, 2019).



Figura 34. Cuarto de incubación y de fructificación. Setas de Siecha, ubicados en Machetá-Cundinamarca (Anaya & Coronado, 2019).

Nota: Los hongos fueron transportados a Bogotá de tal manera que se encontraran alejados de la luz y las condiciones ambientales no afectaran su desarrollo. Cabe recalcar que los hongos fueron transportados antes de ingresar al cuarto de fructificación.

8.1.1.2 Implementación de un prototipo artesanal el desarrollo de los hongos

Para el desarrollo de las diferentes etapas de cultivo se adecuó un espacio cerrado elaborado de manera artesanal con balso de 2 cm, MDF y hule negro para brindar las condiciones necesarias de crecimiento y desarrollo de los hongos. De hecho, el hule negro se elige debido a la necesidad de recubrimiento y para evitar la luz. EL MDF y el balso se eligen para satisfacer las necesidades de soporte del sustrato, estructura y rigidez del prototipo y base de este. De esta forma, se toman las medidas del sustrato de cada especie (*Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*) y se desarrollan encima de una base de MDF. Las estructuras de las dos especies difirieron en la ubicación de la parrilla para poder sostenerlas, puesto que el shiitake fue ubicado de manera horizontal dada su formación y las orellanas se situaron de manera vertical.

8.1.1.3 Etapa de incubación

Para la especie ***Pleurotus ostreatus*** (orellana), la bolsa de sustrato se dispuso de manera horizontal en el prototipo construido donde se mantuvo en penumbra mediante una tapa desarrollada con hule. Cuando se observaron la formación de primordios que se encontraban presionando la bolsa, se abrieron pequeños orificios para que se empezaran a dispersar los hongos. El ambiente se mantenía húmedo de manera manual mediante un aspersor con agua y se mantenía caliente con un secador de cabello para evitar que las temperaturas bajas impidieran el correcto desarrollo de los hongos.

Para la especie ***Lentinula edodes*** (shiitake) se situó el sustrato de manera horizontal en el prototipo y se mantuvieron condiciones de humedad alta, mediante la aspersión con agua en las paredes y en la parte superior. A su vez, se calentó con el secador en la parte inferior para fomentar el crecimiento de los primordios.

En este paso se aconseja mantener una temperatura de 25°C aproximadamente para el desarrollo de los primordios en ambas especies.

8.1.1.4 Etapa de fructificación

Para la especie ***Pleurotus ostreatus*** (orellana) se abrieron las bolsas y se removieron del ambiente de penumbra. Se brindó aire y se humedecieron las paredes y el piso del sitio de cultivo para mantener la humedad relativa alta y favorecer la formación de los cuerpos fructíferos.

Para la especie ***Lentinula edodes*** (shiitake) se debió mantener en condiciones de neblina, es decir con una humedad de casi el 100% para su correcto desarrollo y formación del número deseado de primordios para la etapa de cosecha.

En este paso fue necesario la implementación de un humidificador ultrasónico para asegurar la fructificación de ambas especies.

8.1.1.5 Etapa de cosecha

Para la especie ***Pleurotus ostreatus*** (orellana) se llevó a cabo cuando los bordes exteriores de las setas estaban doblados ligeramente hacia arriba y presentaban una forma cóncava. Las fructificaciones se extrajeron cortando la base del estípite y se limpiaron los residuos de sustrato de los carpóforos. Estos presentaban una tonalidad azul o grisácea.

Para la especie ***Lentinula edodes*** (shiitake) se retiran con cuidado los cuerpos fructíferos del sustrato cuando se encuentren una tonalidad marrón asegurándonos de que no exista ningún residuo del estípite en el bloque para que no se aumente la humedad drásticamente y se infecte el sustrato. Estos presentaban una tonalidad café que se conoce como brownificación.

8.1.1.6 Etapa de post-cosecha

Para la especie ***Pleurotus ostreatus*** (orellana) se inducen humedeciendo el ambiente de cultivo hasta el 90% de humedad relativa y se debe mantener la temperatura a 20°C y se sometieron a las condiciones de cultivo descritas anteriormente.

Para la especie ***Lentinula edodes*** (shiitake) se extrajeron los bloques de la cámara y se mantuvieron en temperaturas de 20-21°C disminuyendo la humedad entre un 30 a un 50%. Seguido a esto, los bloques se sumergieron en agua por 24 horas para su reubicación en la cámara y así reinicie su proceso reproductivo como se describió anteriormente.

8.1.2 Lugar de ejecución dentro de la vivienda

En este paso, se determinó el lugar donde se ubicó el huerto casero automatizado teniendo en cuenta los requerimientos de ingeniería de los sistemas de monitoreo y control así como las dimensiones del sustrato. De esta forma, se optó por escoger un lugar que sea espacioso y que mantenga una buena higiene para reducir riesgos de contaminación por plagas o por otros factores externos. Además que se encontrara lejos de los dormitorios ya que el sistema de iluminación podría ser un malestar para los usuarios durante las noches. Se recomienda también un lugar con buena ventilación. En este orden de ideas, se eligió dentro de la vivienda, la cocina como lugar de ejecución de la cámara de incubación y fructificación de shiitake y orellanas (Figura 35).



Figura 35. Mesón de cocina en la localidad de Usaqué (Anaya & Coronado, 2019).

8.2. Fase 1: Construcción del prototipo automatizado para el desarrollo y crecimiento de los hongos.

Esta fase consiste en la construcción del sistema de monitoreo y control de las variables físicas ambientales vitales la cámara de incubación y fructificación que compone la huerta casera automatiza de shiitake y orellanas. En la figura 36, se puede observar el diagrama de bloques del proceso de monitoreo y control del sistema integrado por un sistema de sensado (sensor de temperatura y humedad relativa, humedad del sustrato, de luz y de distancia), un sistema de actuación (sistema de calefacción, ventilación, lumínico y de riego), un sistema de procesamiento y toma de decisión (microcontrolador), un sistema de visualización (OLED) y un sistema de alerta por un módulo WiFi.

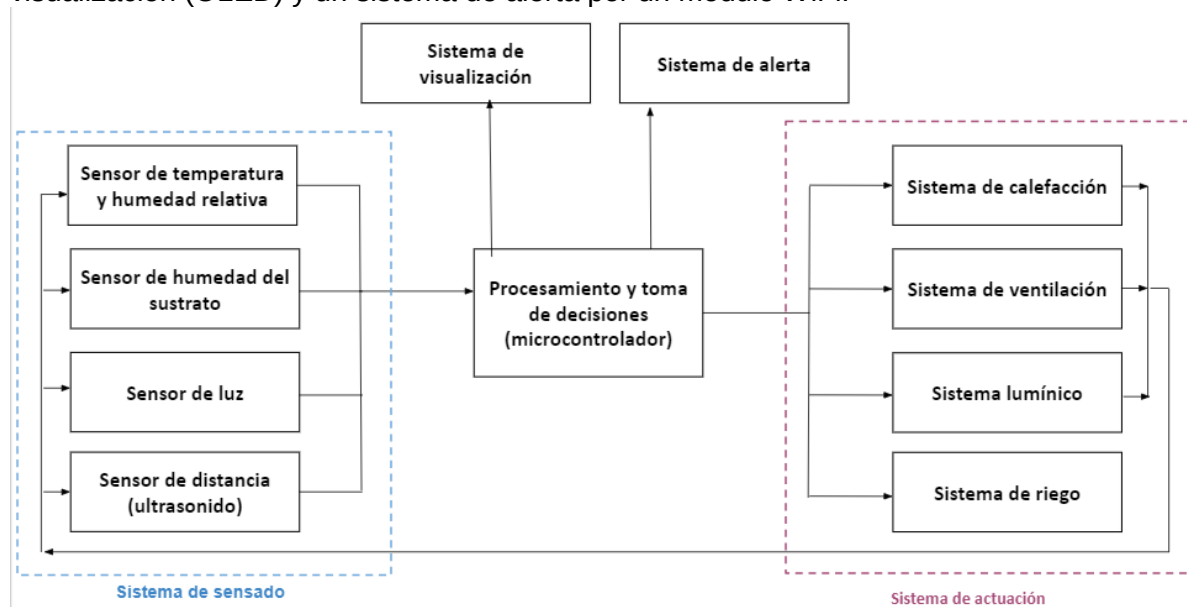


Figura 36. Diagrama de bloques del sistema automatizado (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.1. Selección de componentes a utilizar para el sistema de monitoreo y control.

A partir de la identificación de las variables físicas a tratar, se realizó una selección previa de los componentes electrónicos comparando diferentes características que son indispensables para el buen funcionamiento del sistema y del proyecto como tal. A continuación se presentan las tablas de comparación entre los sensores y actuadores que se necesitan para el funcionamiento de la cámara de incubación y fructificación de los hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) (Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10).

Variable / Modelo	DHT11	DHT22	SHT71/SHT75
Alimentación	3 a 5V y ON/OFF	3 a 5V y ON/OFF	2,4 a 5.5V
Corriente	2.5mA	2.5mA	0.55mA
Precisión de temperatura	±2°C	±0.5°C	±0.4 / ±0.3
Rango de medición de temperatura	0 - 50°C	-40 to 80°C	-40°C - 123.8°C
Precisión de humedad relativa	±5%	±2% - ±5%	±3.0 % / ±1.8%
Rango de humedad relativa	20-80%	0 - 100%	0 - 100%
Frecuencia de muestreo	No más de 1 Hz de frecuencia de muestreo (una vez por segundo)	No más de 0.5 Hz de frecuencia de muestreo (una vez cada 2 segundos)	1 Mhz (5 a 30 segundos)
Calibración	SI	SI	SI
Precio	Bajo costo	Bajo costo	Alto costo

Tabla 8. Comparación del sensor de temperatura y humedad relativa. Adaptado de (Mouser Electronics (s.f)).

Variable / Modelo	Sensores de capacitancia/dieléctricos	Sonda de neutrones	Tensiómetros
Calibración	SI	SI	SI
Precisión de humedad de suelo	Muy buena	Excelente	Muy buena
Rango de medición humedad de suelo	0 - 100	0 a 100	No es útil para suelos secos.
Profundidad de detección	< 1cm desde el sensor	Esfera de 30cm de diámetro	> 6 pulgadas
Tiempo de respuesta	Rápido	Lento	Rápido
Precio	Bajo	Alto	Bajo

Tabla 9. Comparación del sensor humedad del suelo. Adaptado de (Enciso et al., 2007, Reyna et al., 2011 y ICT International, s.f).

Variable /	Módulo LDR -	TEFD4300F	BH 1750	TSL 257
------------	--------------	-----------	---------	---------

Modelo	fotorresistencia GL55			
Alimentación	3.3V a 5.5V	60 V	2.4V~3.6V	2.7 V a 5.5 V.
Corriente	15 mA	150 pA	7 mA	±10 mA
Pico de sensibilidad (longitud de onda)	540 nm	950 nm	560 nm	675 nm
Rango de temperatura en el que funciona	-30 °C a 70 °C	-40 °C a 100 °C	-40 °C a 85 °C	-25°C to 85°C
Tiempo de respuesta	25 ms	100 ns	5 s	160 µs
Precio	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo

Tabla 10. Comparación del sensor de luz. Adaptado de (Vidal Torró, 2016; Mouster Electronics (2011); Electrónicos Caldas (2007, 2011)).

8.2.2. Calibración de los sensores

El método de calibración consiste en realizar una comparación con un sistema de referencia y el sistema que se desea utilizar, para así conocer la precisión y la exactitud con la que se dispone a trabajar.

8.2.2.1 Sensor DHT-22.

Para la calibración de la **temperatura**, el sistema de referencia que se escogió fue un termómetro patrón marca GOLDBRAN de la serie DIN 12770, referencia 804008 con un intervalo de medición de -10 a 360°C con una incertidumbre de $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ y una resolución de $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$ (Piñeiro, 2000).

Se midieron seis temperaturas diferentes, empezando desde los 5°C hasta los 30°C. Para cada temperatura, se tomaron cinco lecturas cada 5 minutos, donde se compararon las lecturas del termómetro patrón con el sensor a calibrar. Se llenó un baño térmico con líquido refrigerante para poder obtener un intervalo amplio de temperaturas y se ubicó el sensor de temperatura y el termómetro a la misma distancia para que no difieran las mediciones.

Se registraron los promedios de las seis temperaturas en una tabla con el objetivo de realizar la gráfica de los resultados, ajustando así una línea de tendencia con el fin de verificar la desviación de los datos entre el instrumento patrón y el sensor a calibrar. Con los resultados se gráfica en el eje "X" la temperatura del termómetro patrón y en el eje "Y" la temperatura del sensor DHT-22.

Para la calibración de la **humedad relativa**, se utilizó el sensor EXTECH RH101 y se tomaron datos cada 5 minutos durante 30 minutos a temperatura ambiente, cada dato fue registrado por triplicado y fue tabulado. Seguido a esto, se tabularon los datos del promedio de las humedades relativas y se ubicó en el eje "Y" los datos que se obtuvieron con el DHT-22 y en el eje "X" los datos obtenidos con el sensor de referencia.

8.2.2.2 Sensor YL-69.

Para la calibración del sensor se sometió un sensor comercial y el sensor YL-69 a tres condiciones diferentes para medir la constante dieléctrica o permitividad del sustrato cuando se encontraba el sustrato seco, húmedo o inundado. Así pues se realizaron las mediciones cada 5 min por triplicado en cada uno de los medios. Para esto se dispone de un sustrato seco, húmedo e inundado en una maceta para realizar las mediciones. Seguido a esto se grafican los promedios de los datos obtenidos, en el eje "X" se encuentran los datos del sensor de humedad comercial mientras que en el eje "Y" se encuentran los datos del sensor a calibrar, siendo el YL-69. Mediante revisión bibliográfica, se encuentra que la salida analógica del sensor arroja datos entre 0 y 4080. Siendo 0 máxima humedad y 4080 nada de humedad. Se hace necesario, entonces, ajustar estas mediciones para obtener valores que oscilen entre 0 y 100.

Así pues, el ajuste se realiza calculando una recta tal que en el eje de abscisas se encuentre la salida en voltios (V) del sensor y en el eje de ordenadas el valor de humedad relativa en % que le corresponda. Conocidos dos puntos (0 mV, 100% HR) y (4080 mV, 0% HR), se obtiene (Eodos, 2015):

$$Pendiente : m = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = \frac{0 - 100}{4080 - 0} = -0.0245$$

$$Recta : y = y_0 + m \cdot (x - x_0) = 100 - 0.0245 \cdot x$$

8.2.2.3 HR-SC04

En primer lugar, para el procedimiento de calibración del HR-SC04, se realiza una medición durante al menos 2 μ s para medir el pulso del pin trigger, una medición de 10 μ s con el fin de enviar el tren de pulsos. Enseguida, se recibe el pulso de respuesta del sensor del pin Echo y, finalmente, se realiza la misma medición esperando la recepción hasta 30 ms como máximo y si esto se cumple, se indica que no se ha detectado ningún objeto. Se guarda en una variable t (tiempo), el valor que traduce lo que dura en llegar el eco del ultrasonido para así calcular la distancia entre el sensor y el objeto. Para esto, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Velocidad = \frac{Distancia recorrida}{Tiempo}$$

Donde velocidad es la velocidad del sonido 340 m/s, distancia recorrida es dos veces la distancia hacia el objeto y el tiempo representa el tiempo que se demora en llegar el ultrasonido al objeto y regresar al sensor (Naylampmechatronics, 2017).

8.2.3 Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo (figura 37) permite conocer los datos cuantitativos de las variables físicas de interés obtenidos con ayuda de sensores específicos a estas variables. Esta etapa es clave para fulminar el producto ya que es a partir de estos datos que se realiza el control de las variables, permitiendo así generar un ambiente con condiciones favorables para el crecimiento y desarrollo de los shiitakes y de las orellanas. Efectivamente, los datos son recogidos y procesados por sensores de radiación lumínica (LDR tipo GL55), de distancia mediante ultrasonido (HC-SR04), temperatura y humedad relativa (DHT22) y humedad del suelo (YL-69), los dos últimos previamente calibrados, conectados a un microcontrolador Arduino Mega 2560. Cabe mencionar, que antes de realizar el montaje del circuito electrónico en físico, se diseñó el montaje del circuito en el programa libre de automatización de diseño electrónico Fritzing (Figura 37). A lo largo de este aparte, se detalla el diseño del sistema de monitoreo y la metodología que se siguió con cada sensor.

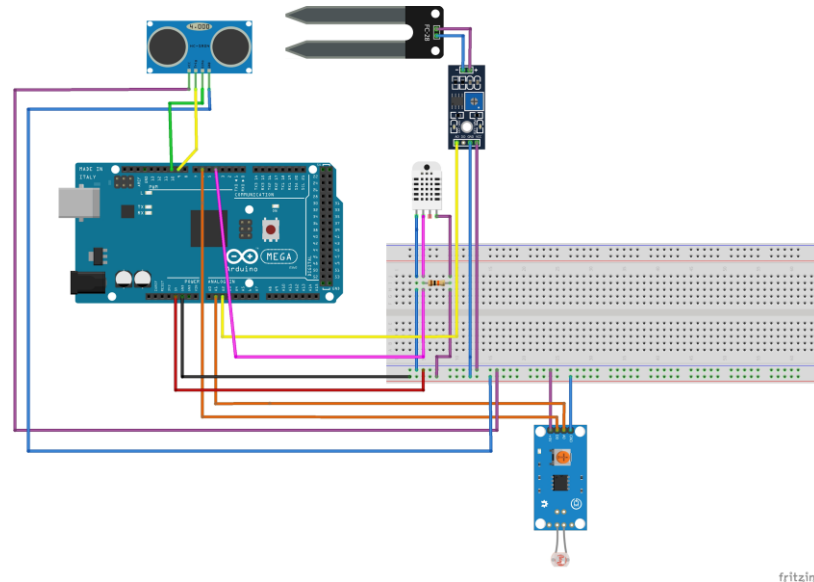


Figura 37. Diseño del circuito de sistema de monitoreo para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) realizado en Fritzing (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.4 Sistema de control

El sistema de control es un sistema que permite actuar sobre las variables de interés. En este caso, las variables físicas que se planean controlar son temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, distancia al fondo del tanque y nivel de luz. Dicho sistema se compone de actuadores, los cuales forman las salidas del sistema para así poder mantener las condiciones ambientales dentro de los rangos establecidos en el algoritmo de programación. De esta manera, la cámara de incubación y fructificación de hongos consta de cuatro sistemas de control (figura 38): Sistema de calefacción, sistema de ventilación, sistema de riego y sistema lumínico. Antes de realizar el montaje del circuito electrónico en físico, se diseñó el montaje del circuito en el programa libre de automatización de diseño electrónico Fritzing (figura 38).

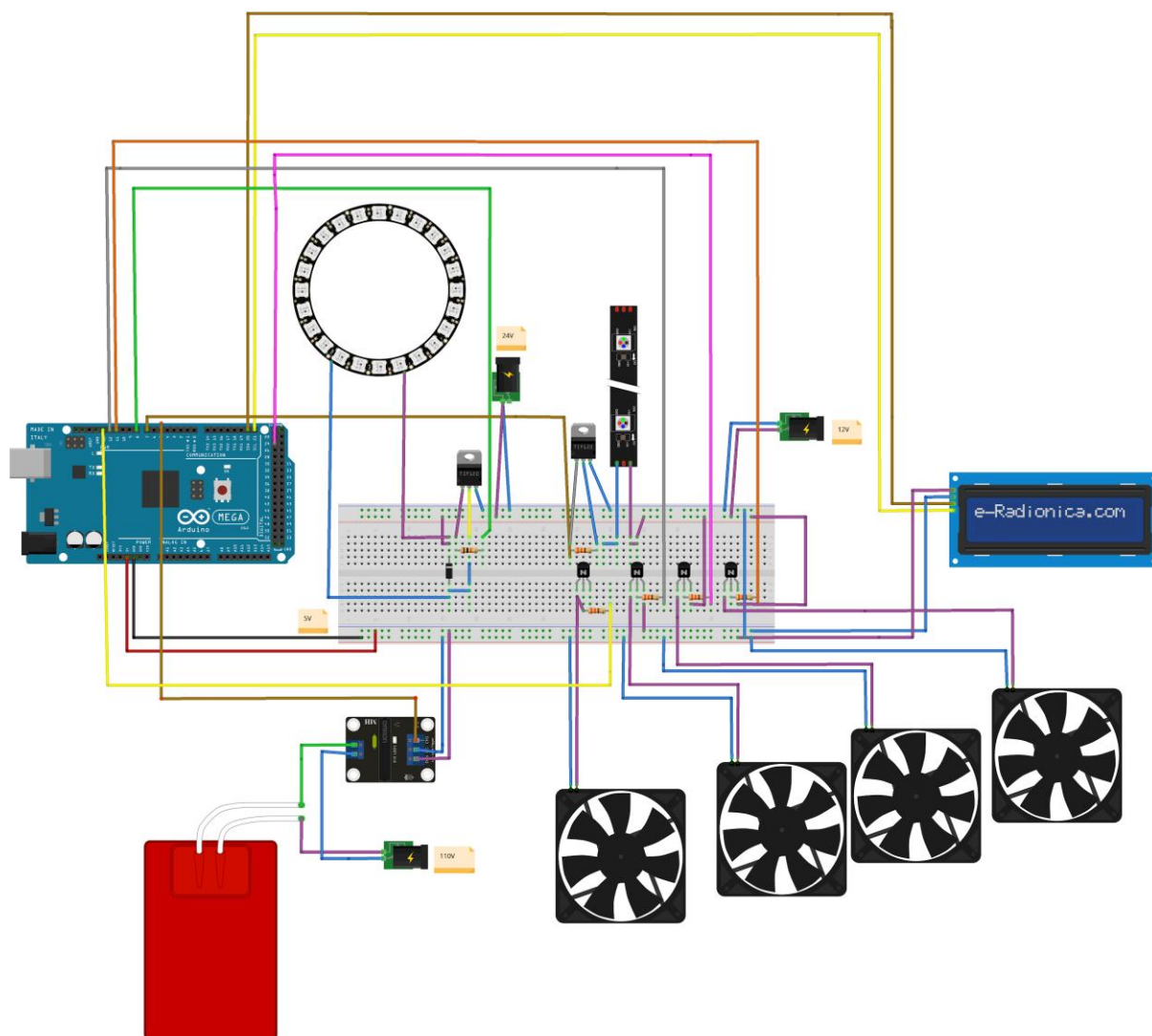


Figura 38. Diseño del circuito de sistema de control para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) realizado en Fritzing (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.4.1. Selección del sistema de control

El sistema de control se determina mediante el análisis de las necesidades del sistema para así poder seleccionar el control que más se ajusta. En este paso identificamos las diferencias existentes entre los tipos de control de acuerdo a cómo se genera la acción de control:

Sistema de control	Descripción	Ventajas	Desventajas
ON-OFF	El controlador sólo posee dos estados (encendido y apagado). Se compara el valor medido con el valor de referencia y dependiendo del	• Forma más simple de control. • Bajo precio de instalación. • Fácil instalación y	• Mínima precisión. • Se debe establecer un rango de variables en vez de un solo setpoint

	error se presenta la acción de control.	mantenimiento.	para evitar que se desgasten los actuadores.
Proporcional	El elemento final de control efectúa un movimiento proporcional a la magnitud del error.	• Se tiene una proporción exacta entre la apertura de la válvula de control y el valor de la variable de proceso.	• Se puede presentar un offset, ya que la acción de control es constante si el error lo es.
Derivativo	Es la acción de control donde el valor de la salida es proporcional a la velocidad de variación de la señal de error actuante.	• Aumenta el ancho de banda. • Reduce el sobreimpulso máximo. • Disminuye el tiempo de asentamiento.	• Es muy sensible al ruido.
Integral	Disminuir y eliminar el error en estado estable provocado por el modo proporcional.	• Eliminar el error en estado estacionario.	• Su respuesta es lenta y oscilatoria.
PID	Permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa.	• El error en estado estable entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta sea cero. • Es capaz de anticipar a través de la acción derivativa.	• Amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación el actuador. • Oscilación del sistema.

Tabla 11. Comparación de los tipos de control de acuerdo a cómo se genera la acción de control. Adaptado de (Dorf, Bishop, Canto, Canto, & Dormido, 2005).

Basándonos en la información expuesta anteriormente se decidió seleccionar el control **ON-OFF**. Este tipo de control siendo de lazo cerrado nos permitía regular la salida en función de las variables de entrada. A su vez, al ser de fácil mantenimiento y bajo costo nos proporcionaba que la interfaz con el usuario fuera de fácil manipulación.

8.2.4.2 Sistema de calefacción

En primer lugar, se establece un valor de referencia de temperatura 24 °C para la etapa de incubación y de 18 °C para la etapa de fructificación. Estos valores se identifican después de realizar la revisión bibliográfica de los shiitake y de las orellanas (Remitirse a Marco teórico).

En segundo lugar, para el montaje del sistema de calefacción, se realizó una consulta bibliográfica y se seleccionó una resistencia de calefacción metálica que hace parte de los elementos de un prototipo normal de incubadora. Esta resistencia tiene una potencia de 80W y se alimenta a 110V. En un primer tiempo, la corriente alterna (AC) alimenta la resistencia por lo que es imposible que un Arduino pueda resistir ese voltaje. Para solucionar esto, se opta por utilizar un relé de estado sólido (voltaje de operación: 5V y corriente: 2 A) capaz de conmutar corriente alterna. La función del relé sólido (State Solid Relay o SSR, por sus siglas en inglés) es de permitir el paso o no de la corriente, exactamente como un switch. De esta manera, un pin de la resistencia se conecta al pin normalmente abierto (Normally Open o NO, por sus siglas en inglés) y el otro pin se conecta al borne positivo de una toma de corriente de 110V. Por otro lado, el borne negativo de la toma se conecta al pin normalmente cerrado (Normally Closed o NC, por sus siglas en inglés). Del relé de estado sólido salen 3 pines: 5V, GND y el pin del canal 1 (Channel 1 o CH1, por sus siglas en inglés), es decir la entrada que recibe la señal. Estos pines se conectan a la línea positiva de la protoboard, tierra y a un pin digital D5 del Arduino Mega 2560, respectivamente. El SSR utilizado es un relé de conmutación nivel bajo, lo que significa que la entrada (CH1) debe ser baja para poder encender el switch, es decir cuando el relé está en 0, se enciende y cuando está en 1, se apaga. Por definición, se tiene que si el relé es de nivel bajo, esto significa que el voltaje entre el terminal de activación de la señal (CH1) y la tensión de alimentación negativa es 0V, o el voltaje en la terminal de activación es inferior a la tensión de la alimentación positiva. Si baja a un voltaje de activación, el relé se activará. Generalmente, se conectan juntos el voltaje negativo de la alimentación y el terminal de activación (Sunfounder, 2017).

Con el objetivo de que el calor se disipe a lo ancho y largo de la cámara, se decide agregar un ventilador con motor de corriente continua o DC (Direct Current) arriba de la resistencia de calefacción. Como se explica en el aparte del sistema de ventilación, se emplea un transistor bipolar NPN 2N2222A, una resistencia de 330Ω y se conecta la salida de la resistencia al pin digital D11 del Arduino Mega 2560, donde se recibe la señal para activar el ventilador.

8.2.4.3 Sistema de ventilación

Se establece un valor de referencia de la humedad relativa de 60% a 80% para la etapa de incubación y de 80% a 100% para la etapa de fructificación. Estos valores se identifican después de realizar la revisión bibliográfica de los shiitake y de las orellanas (Remitirse a Marco teórico).

El sistema de ventilación permite la aireación de la cámara de incubación y fructificación de shiitake y orellanas. Este sistema se compone por un ventilador y un extractor con motor de corriente continua o DC (Direct current) de registro digital, los cuales funcionan a 5V y consumen 0,2A. Se emplean transistores bipolares plásticos NPN 2N2222A de baja potencia cuya alimentación se da a 5V y su consumo es de 600 mA y también se utilizan resistencias de 330Ω. El emisor del transistor se conecta al borne positivo del ventilador, la base se conecta a la resistencia de 330Ω, la cual protege la cantidad de corriente que atraviesa al transistor y el colector se conecta a la línea VCC de la probboard. Es a partir de la base que se consigue regular el motor del ventilador. Finalmente, del segundo borne de

la resistencia, se conecta un jumper directamente a D12 para el ventilador y a D13 para el extractor, el cual procesa la señal para que tanto el ventilador como el extractor funcionen de manera adecuada. Evidentemente, las aspas del extractor se dirigen hacia afuera de la cámara y las del ventilador hacia adentro.

8.2.4.4 Sistema de riego

Se establecen los umbrales de respuesta del sensor de humedad de suelo YL-69 de acuerdo a una revisión bibliográfica y teniendo en cuenta que los datos de salida del sensor son valores entre 0 y 1023. Los valores cuantitativos de estos umbrales y sus respectivos significados cualitativos son (GitLab, 2018):

- mayor o igual a 1000 - sensor desconectado.
- menor a 1000 y mayor o igual a 600 - sustrato seco.
- estrictamente menor a 600 y mayor o igual a 370 - sustrato húmedo.
- estrictamente menor a 370 - sustrato en agua.

El sistema de riego compone el sistema que se encarga de controlar los requerimientos de agua que necesita el sustrato a partir de los datos monitoreados por el sensor YL-69. En efecto, el humidificador se encarga de regular el flujo de agua acorde a las necesidades del sustrato de los hongos. Para esta parte, se utilizó un humidificador ultrasónico de 24V DC, un diodo 1N1007, un TIP 120, un cargador de 24V y una resistencia de 10kΩ.

8.2.4.5 Sistema lumínico

Se establecen los umbrales de respuesta del sensor de luz LDR de acuerdo a una revisión bibliográfica y teniendo en cuenta que los datos de salida del sensor son valores entre 0 y 1023. Los valores cuantitativos de estos umbrales y sus respectivos significados cualitativos son (Arduino, 2015):

- estrictamente mayor a 600 nm
- menor o igual a 600 nm

El sistema lumínico interpreta los valores tomados por el luxómetro LDR y enciende o apaga dos cintas LED de 12V azules, 18W y 1.5A para de mantener iluminada la cámara de fructificación. Se utilizan, entonces, dos cintas LED azules, un TIP 120 (que soporte la corriente de la cinta LED), una resistencia de 330Ω y una fuente de alimentación de 12V, en este caso un cargador. La conexión de este sistema es igual a la del sistema de Riego (Remitirse a 8.2.4.4 Sistema de riego). Del borne de la resistencia de 330Ω se conecta la entrada al Arduino en el pin digital D7.

8.2.4.6. Sistema de alimentación

Para el sistema de alimentación se utilizó un conector IEC con switch y un fusible para poder dar alimentación al sistema. Este se encuentra conformado por la fase, neutro y tierra los cuáles fueron conectados a un regulador AC-DC de 24V y suministrado a un convertidor DC-DC que se encargaba de suplir el voltaje de 12V al sistema y a su vez poder alimentar el microcontrolador que trae consigo un regulador de 5V.

8.2.5 Sistema de alerta

El sistema de alerta es una herramienta que le permite al usuario actuar sobre la cámara de incubación y fructificación en caso de que el sistema de control sea incapaz de hacerlo.

Para este sistema, se utiliza el módulo ESP32 WiFi-Bluetooth, un convertidor DC-DC 3A Reductor MP1584 Salida USB, un buzzer y el Arduino Mega.

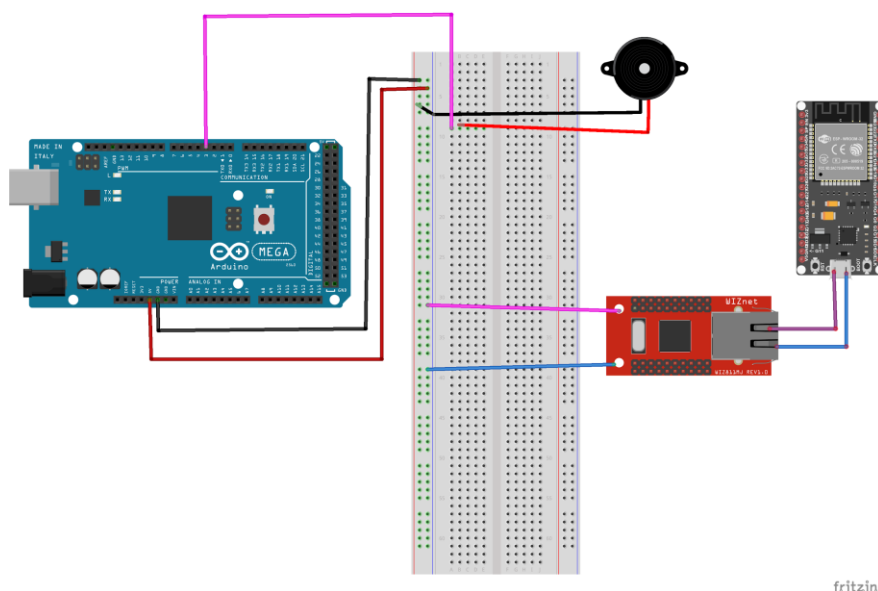


Figura 39. Diseño del circuito de sistema de alerta para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) realizado en Fritzing (Anaya & Coronado, 2019).

En la tabla 12, se agrupan el tipo de notificaciones que envía el módulo ESP32.

Variable	Notificación	Función
Temperatura (°C)	"Temperatura: _°C"	Funcionamiento/Calidad
Humedad Relativa (%)	"Humedad: _%"	Funcionamiento/Calidad
Humedad del suelo (%)	Sensor no está en el sustrato	Seguridad/Funcionamiento
Humedad del suelo (%)	Sensor en agua:ALERTA	Seguridad/Funcionamiento
Distancia al fondo del tanque	ALERTA: Por favor llenar el tanque	Seguridad/Funcionamiento

Tabla 12. Tipo de notificación del sistema de alerta desde el módulo WiFi (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.6 Sistema de visualización

A través de la OLED, se logra la visualización de las variables de interés, en este caso de la temperatura (°C), humedad relativa (%) y humedad del suelo (%). La OLED se controla con tan solo 4 pines: el pin VCC y GND se conectan a la línea VCC y tierra del arduino en la protoboard y los pines SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock) se conectan a los pines SCL y SDA del Arduino Mega 2560 . El circuito electrónico se puede observar en la figura 40.

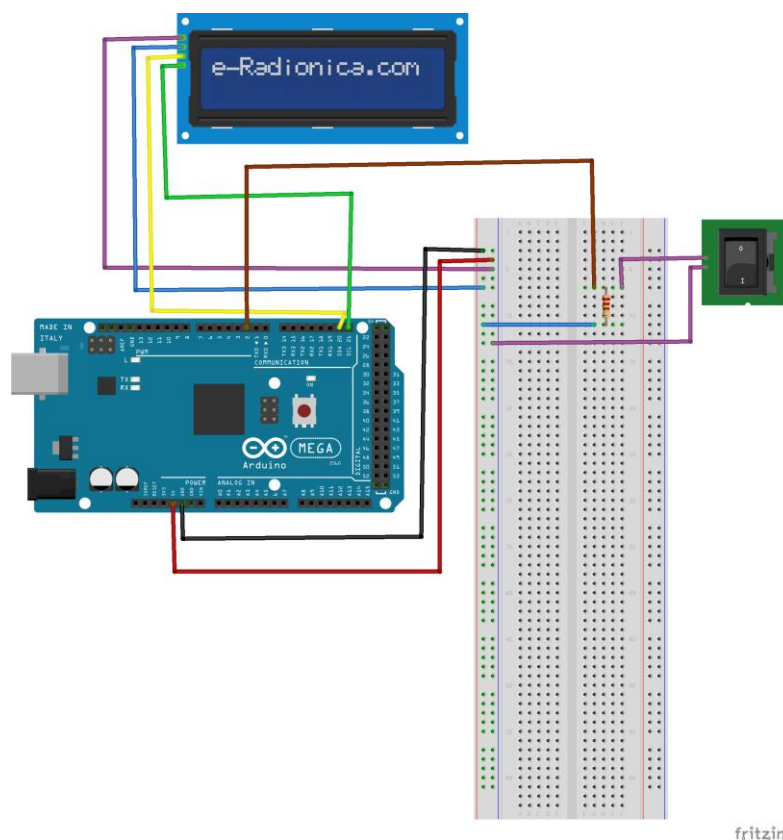


Figura 40. Diseño del circuito del sistema de visualización para la huerta casera automatizada de hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) realizado en Fritzing (Anaya & Coronado, 2019).

Mensaje	Fase
INCUBACIÓN Temperatura: 23.6C Humedad: 96.30%	Incubación
FRUCTIFICACIÓN Temperatura: 23.6C Humedad: 96.4%	Fructificación
1. Sensor está desconectado o no está en el sustrato 2. Sustrato húmedo: No regar 3. Sustrato seco: REGAR 4. Sustrato en agua: ALERTA	Incubación/Fructificación
Por favor llenar el tanque.	Incubación/Fructificación

Tabla 13. Tipo de mensaje en el sistema de visualización por medio del OLED (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.7 Sistema de monitoreo y control

El sistema de monitoreo y control se diseñó para sensor y controlar el prototipo durante todo el día con un periodo entre mediciones de temperatura y humedad relativa; humedad del

suelo, distancia al fondo del tanque e intensidad de luz. Adicionalmente, se diseñó para que el usuario pueda tener acceso al programa de Arduino cuando lo necesite. En la figura 38 y 40, se observa el montaje del circuito electrónico de los sistemas de monitoreo y control, además del sistema de visualización que utiliza la pantalla OLED. Por último, en la tabla 12 se recopilan todos los componentes electrónicos utilizados en el sistema automatizado.

Componente	Cantidad
Arduino Mega 2560	1
DHT22	1
YL69	1
LDR	1
HC-SR04	1
Humidificador 24V	1
Diodo 1N1007	1
Transistor 2N2222A	3
TIP 120	3
Ventilador (5V y 12V)	4
OLED 0.91" 128 x 32	1
Switch ON/OFF	1
Buzzer	1
ESP32	1
Convertidor DC-DC 3A Reductor MP1584 Salida USB	1
Resistencia de calefacción	1
Relé de estado sólido	1
Reductor de voltaje	1
Cinta LED	2
Resistencia 10k Ω	2
Resistencia 330k Ω	4
Cargador 24V	1
Socket Fuse 110V	1

Cable de poder 110V	1
Cables Calibre 18/22	Varios
Termoencogible	Varios

Tabla 14 Cantidad de componentes electrónicos de la huerta casera automatizada de hongos comestibles (*Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.*) (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.8 Software

8.2.8.1 Software en Arduino

El algoritmo de programación se establece a partir de los rangos obtenidos en la selección del control ON/OFF para cada uno de los sistemas (calefacción, ventilación, riego y luz). Se seleccionan la tarjeta Arduino Mega 2560, el Puerto Serial y el puerto COM del ordenador al que se conecta el Arduino. Se incluyen las librerías de la pantalla OLED y del sensor DHT22. Se realiza el código teniendo en cuenta los pines de entrada y salida digitales como analógicos (tabla 15). El algoritmo consta de dos etapas. La primera en donde se declaran las variables de los sensores, actuadores, del OLED y se establecen de qué tipo son (enteros, constantes, decimal simple). La segunda en donde se parametriza el OLED, se declaran si las variables son de tipo entrada (INPUT) para los sensores o salida (OUTPUT) para los actuadores bajo el comando void setup() y donde se ejecuta el código como tal bajo el comando void loop(). En este último, se definen los sistemas de control ON/OFF por cada actuador. Para el sistema de calefacción, se realiza un ciclo teniendo en cuenta que el valor de referencia es 24 para la etapa de incubación y 18 para la etapa de fructificación. Si el valor sobrepasa esa referencia, se apaga la resistencia de calefacción, de lo contrario se enciende. Lo mismo sucede con el valor de referencia de la humedad relativa, 80 para la etapa de incubación y 95 para la etapa de fructificación. Si se sobrepasa este valor, se encienden el sistema de ventilación, de lo contrario se apaga. Para el sistema de riego, los valores obtenidos en digital van desde 0 sumergido en agua, a 1023 en el aire (o en un sustrato muy seco). Un sustrato en agua daría valores inferiores a 370. Un sustrato ligeramente húmedo daría valores típicos de 370-600. Un sustrato seco tendrá valores de 600-1000. De esta forma, para cada uno de los umbrales, dependiendo de las necesidades, se encenderá o apagará el humidificador. Finalmente, para el sistema de iluminación, si la longitud sobrepasa los 600 nm, se apaga la LED, en caso contrario se enciende. Las salidas del DHT22 y el YL-69 se imprimen en el OLED.

Sensor/Actuador	Unidad de Control	Tipo de entrada o salida	Pin
DHT22	Arduino Mega 2560	Digital	D4
YL-69	Arduino Mega 2560	Análoga	A2
LDR	Arduino Mega 2560	Análoga y Digital	A1 y 6
Resistencia de calefacción	Arduino Mega 2560	Digital	D5
Ventilador 1 5V 2A (SunFlow)	Arduino Mega 2560	Digital	D12

Extractor 5V 2A (SunFlow)	Arduino Mega 2560	Digital	D13
Ventilador Resistencia 12V	Arduino Mega 2560	Digital	D24
Ventilador Humidificador 12V	Arduino Mega 2560	Digital	D11
Humidificador ultrasónico	Arduino Mega 2560	Digital	D8
Cinta LED	Arduino Mega 2560	Digital	D7
OLED	Arduino Mega 2560	Digital	SDA y SCL
Switch	Arduino Mega 2560	Digital	D2
Buzzer	Arduino Mega 2560	Digital	D3

Tabla 15. Entradas y salidas del sistema (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.8.2 Software en MATLAB

Para observar el tiempo que tarda el actuador en activar la señal de control en los distintos sistemas en cada etapa (incubación y fructificación), se extrae cada una de las tablas de los datos de las variables físicas específicas (temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, longitud de onda) y sus respectivos tiempos de estabilización en el software MATLAB. Se diseñaron cuatro algoritmos diferentes para obtener las gráficas de los valores de salida con respecto a los valores de entrada, la gráfica de acción de control y de la respuesta al impulso. Igualmente, se utilizó System Identification (Figura 41), dentro de Simulink, para obtener la función de transferencia y la gráfica de polos y ceros.

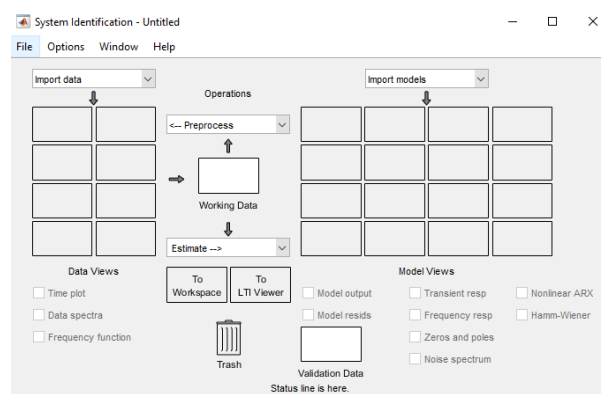


Figura 41. System Identification MATLAB (Anaya & Coronado, 2019).

8.2.9 Diseño de la cámara de incubación y fructificación

Después de dimensionar el mesón de la cocina, se identificaron las dimensiones de los sensores y actuadores involucrados en el sistema (tabla 16). Se diseñó la cámara de incubación y fructificación en el Software Autodesk Fusion 360 teniendo en cuenta, además, las dimensiones del sustrato de hongos comestibles de ambas especies *Lentinula* y *Pleurotus*.

Componente electrónico	Dimensiones
DHT22	12 mm x 23.5 mm x 5.5 mm (Bogdan, 2016).
YL69	60 mm x 30 mm x 0.5 mm (Rawal, 2017).
LDR	33mm x 15mm x 5mm (Bawa, 2013).
Ventilador 5V	60 mm x 60 mm x 10 mm (Anaya & Coronado, 2019).
Resistencia de calefacción	Cilindro: diámetro: 88 mm, longitud: 150 mm Resistencia: 300 mm (Anaya & Coronado, 2019).
LEDs	longitud: 400 mm (Anaya & Coronado).
OLED	128 mm x 32 mm x 6 mm.
Arduino UNO	68.6 mm x 53.3 mm (Arduino, s.f.).
Arduino MEGA	101.52 mm x 53.3 mm (Arduino, s.f.).
DC plug macho	Diámetro: 10 mm (Anaya & Coronado, 2019).
Enchufe - toma 110V	Diámetro: 2 mm (Anaya & Coronado, 2019).
Adaptador ½" a ¾"	Diámetro: 19 mm (Anaya & Coronado, 2019).

Tabla 16. Dimensiones componentes electrónicos para el diseño del prototipo de huerto casero automatizado (Anaya & Coronado, 2019).

Para esta fase, se diseñaron tres prototipos diferentes. A continuación, se exponen los planos, los modelados y el renderizado del prototipo artesanal, prototipo preliminar y prototipo final, respectivamente. El diseño de los prototipos se realiza en softwares especializados (Fusion 360, SolidWorks) con el objetivo de entender la implementación de los sistemas de control, así como de las dimensiones del prototipo y de los materiales a usar.

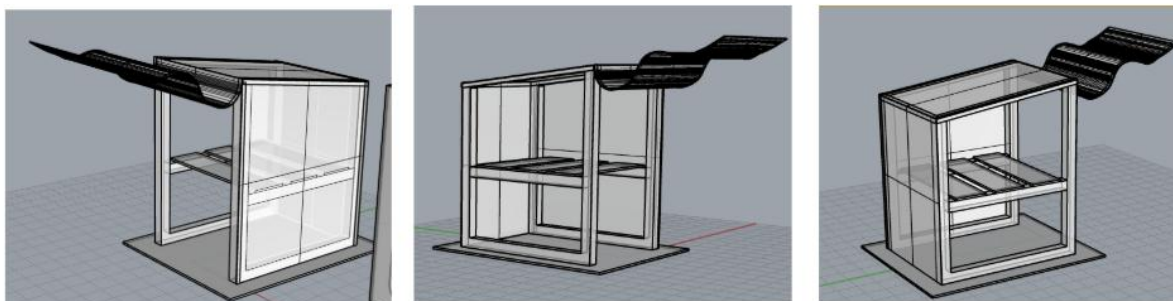
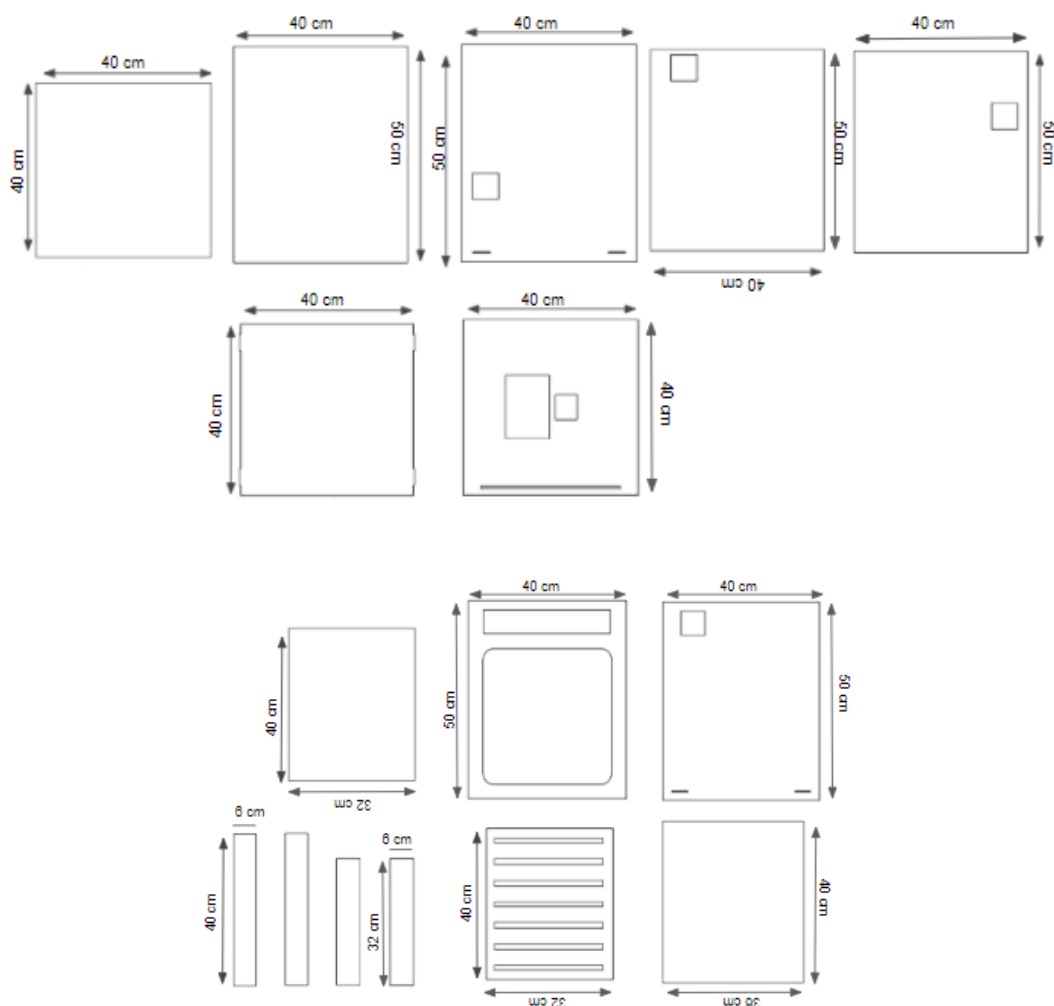


Figura 42. Modelado prototipo artesanal del huerto casero de hongos comestibles en 3D. (Anaya & Coronado, 2019).



Figura 43. Renderizado del prototipo artesanal del huerto casero de hongos comestibles en 3D. (Anaya & Coronado, 2019).

A continuación, se esbozan los diseños del huerto preliminar del prototipo de huerto casero para cultivo de shiitake y orellanas.



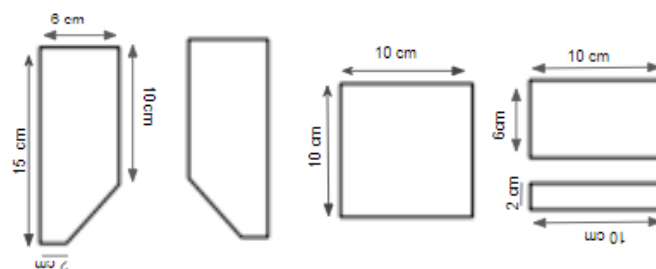


Figura 44. Planos del prototipo preliminar de la cámara de incubación y fructificación para hongos *Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.* (Anaya & Coronado, 2019).

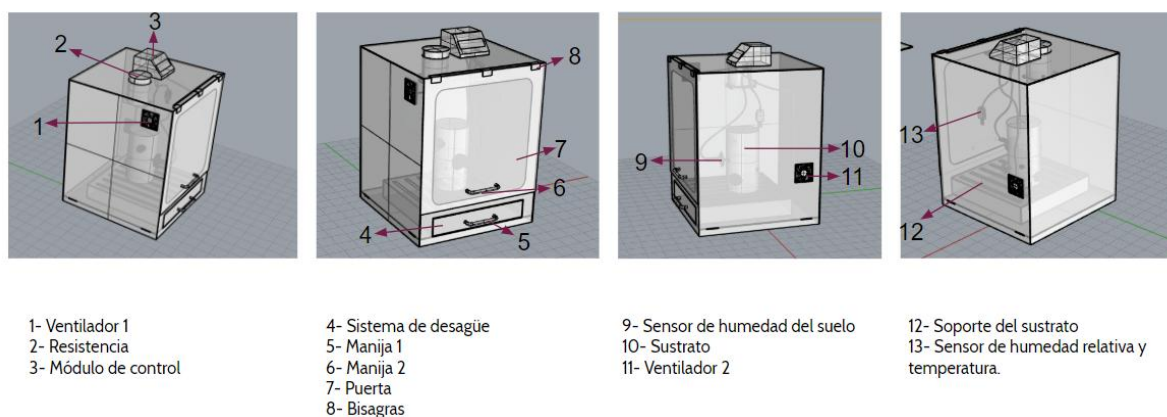


Figura 45. a. Modelado prototipo preliminar del huerto casero de hongos comestibles en 3D. (Anaya & Coronado, 2019).

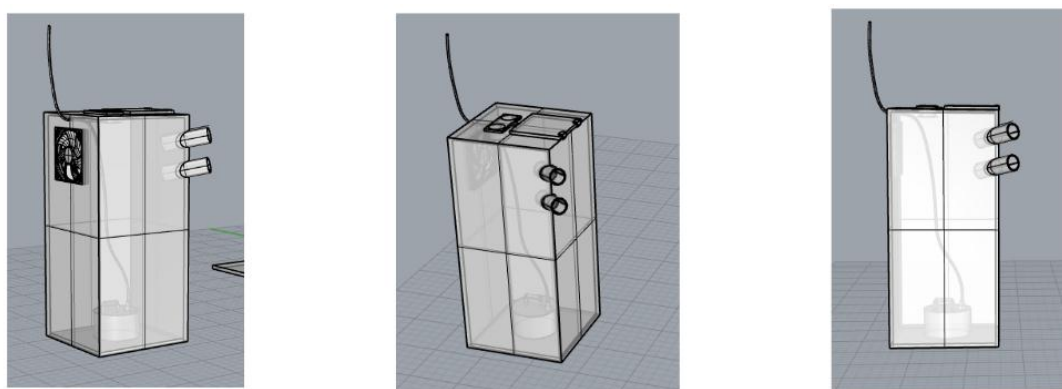


Figura 45. b. Modelado prototipo preliminar del sistema de riego en 3D. (Anaya & Coronado, 2019).

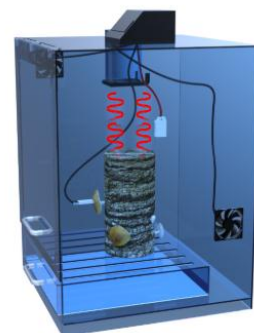


Figura 46. a. Renderizado prototipo preliminar en 3D del huerto casero. Vistas en perspectiva (Anaya & Coronado, 2019)

En el prototipo preliminar, para el sistema de ventilación y el acondicionamiento del flujo de aire, se decide ubicar un ventilador y un extractor en caras y esquinas opuestas de forma que se asegure un flujo de ventilación continuo y total en la caja de incubación y fructificación recorriendo así el mayor espacio posible entre la entrada y la salida. Se ubica el ventilador en la parte superior y el extractor en la inferior con el fin de generar una circulación del aire por diferencia de presiones entre dos zonas: una de mayor presión y una de menor presión. En este caso, se elige que el aire sea impulsado a través del ventilador, creando una sobrepresión bajo una ventilación-extracción mecánica (Figura 46 b. i.) (UPM, s.f.). Para el sistema de ventilación, se elige colocar la resistencia de calefacción en la tapa superior para mantenerla lo más alejada posibles de materiales en los que pueda tener un efecto negativo y además ya que, por la gravedad, genera demasiado calor residual que puede ser dañino para el sustrato (Figura 46 b. ii.). El sistema de riego se compone de un tanque de agua con un humidificador en su interior, del cual se origina una columna de vapor de agua propicia para mantener una humedad relativa y del sustrato adecuadas. Se decide realizar un comportamiento externo y removible para que sea fácil de ocupar y desocupar de la fuente hídrica. Este tanque cuenta con una tapa por donde se realiza el llenado de agua del tanque y un ventilador de 5V que genere el impulso de aire para que el vapor de agua pueda salir direccionado hacia el sustrato (Figura 46 b. iii.). Finalmente, en el sistema lumínico, se decide implementar las luces LEDs en dos aristas superiores y opuestas de la cámara de incubación y fructificación con el objetivo de iluminar en su totalidad el sustrato y direccionar la luz hacia el centro de la cámara (Figura 46 b. iv.)



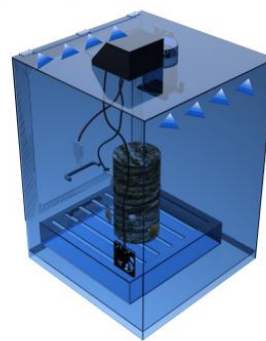
i. Sistema de ventilación



ii. Sistema de calefacción



iii. Sistema de riego



iv. Sistema lumínico

Figura 46. b. Sistemas de control del prototipo preliminar en 3D del huerto casero. Vistas en perspectiva (Anaya & Coronado, 2019)

A continuación, se esbozan los diseños del prototipo final del de huerto casero para cultivo de shiitake y orellanas.



Figura 47. Planos del prototipo final de la cámara de incubación y fructificación para hongos *Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.* (Anaya & Coronado, 2019).

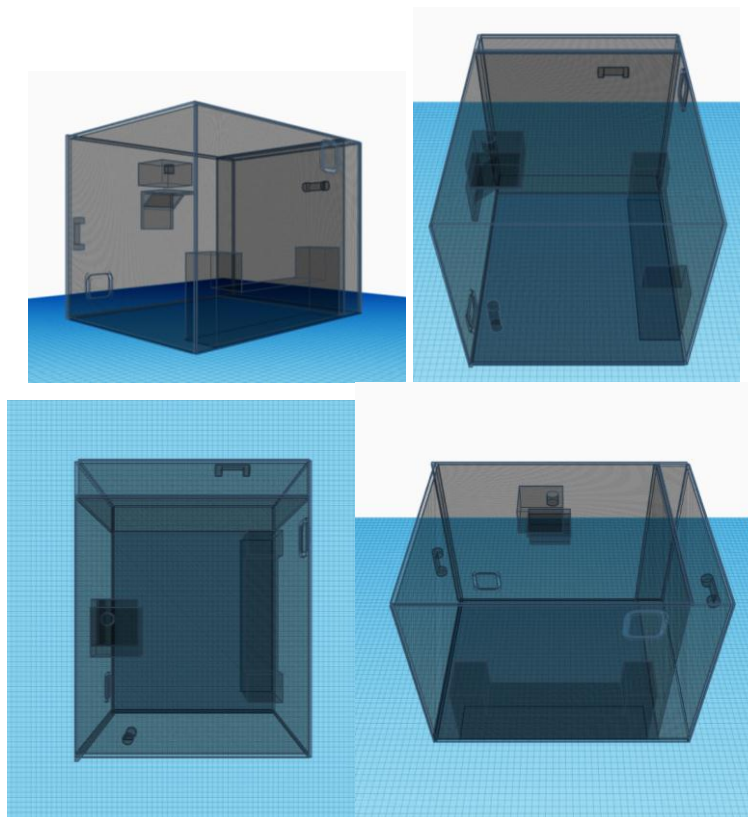
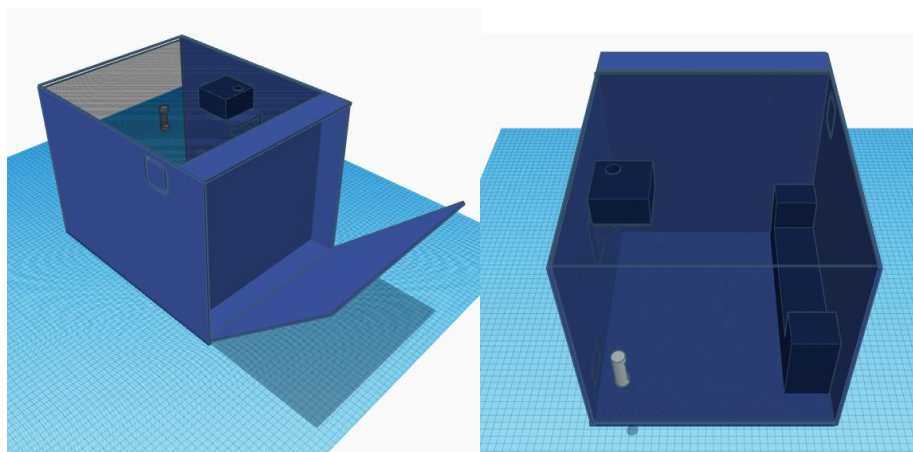


Figura 48. Modelado prototipo final en 3D. Vistas en perspectiva (Anaya & Coronado, 2019)



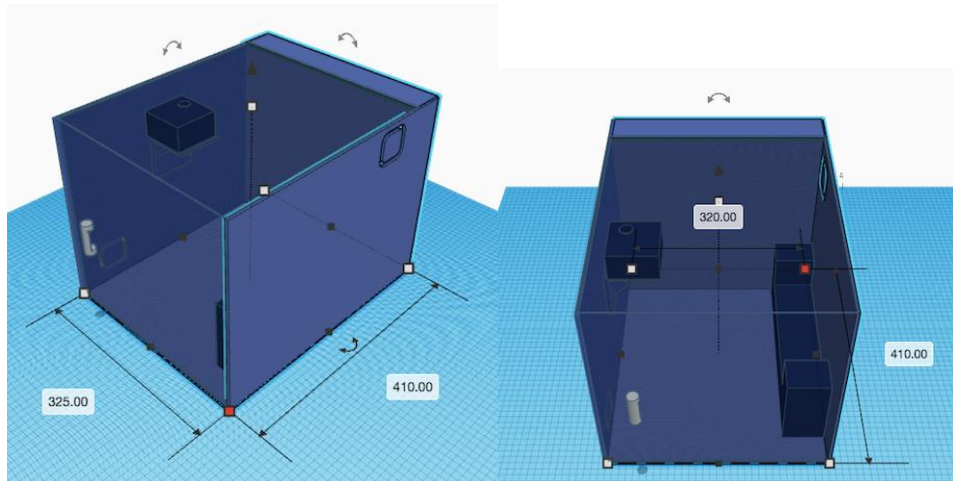
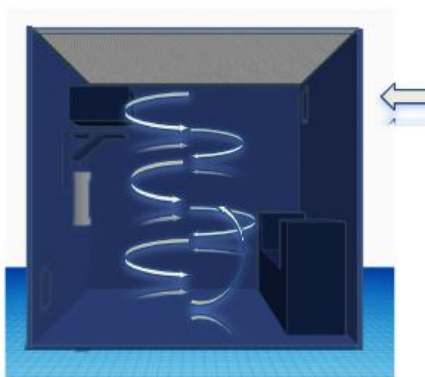
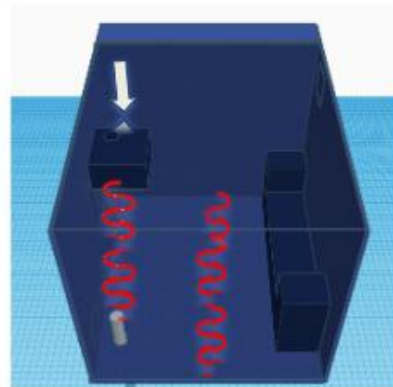


Figura 49. a. Renderizado prototipo final en 3D. Vistas en perspectiva (Anaya & Coronado, 2019)

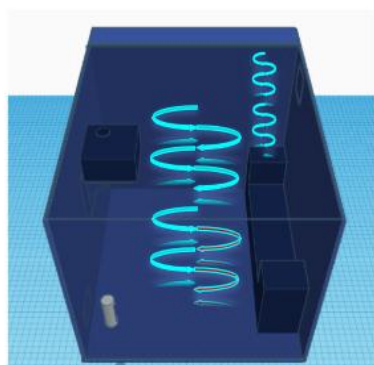
En el prototipo final y al igual que el preliminar, se ubica el sistema de ventilación por sobrepresión (Figura 47.i.). Para el sistema de ventilación, se elige diseñar un comportamiento en MDF para colocar la resistencia y ventilador turbo de 12V que genere un flujo de aire lineal con el fin de que el calor se dirija a lo largo de la cámara de incubación y fructificación (Figura 47 b. ii.). El sistema de riego se compone de un tanque de agua con un humidificador en su interior, del cual se origina una columna de vapor de agua propicia para mantener una humedad relativa y del sustrato adecuadas. Se decide realizar un comportamiento externo y removible para que sea fácil de ocupar y desocupar de la fuente hídrica. Este tanque cuenta con una tapa por donde se realiza el llenado de agua del tanque y un ventilador de 12V que genere el impulso de aire para que el vapor de agua pueda salir direccionado hacia el sustrato (Figura 47 b. iii.). Finalmente, en el sistema lumínico, se decide implementar las luces LEDs en dos aristas superiores de la cámara de incubación y fructificación con el objetivo de iluminar en su totalidad el sustrato y direccionar la luz hacia el centro de la cámara (Figura 47 b. iv.)



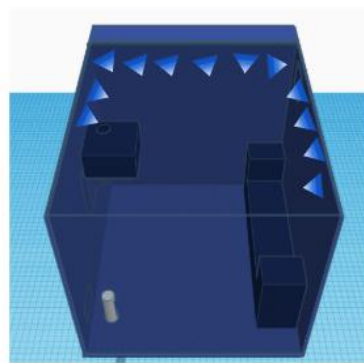
i. Sistema de Ventilación



ii. Sistema de calefacción



iii. Sistema de humidificación



iv. Sistema lumínico

Figura 49. b. Sistemas de control prototipo final en 3D. Vistas en perspectiva (Anaya & Coronado, 2019)

8.3. Fase 2: Evaluación del huerto casero automatizado

Esta fase se traduce como la evaluación del huerto casero automatizado al realizar pruebas específicas de crecimiento y desarrollo del sistema vivo. Por ejemplo, una metodología a considerar es la comparación del desarrollo y crecimiento en dos sistemas diferentes. Un sistema en donde las condiciones de los hongos comestibles sean monitoreadas y controladas en un prototipo hermético y un sistema monitoreado y controlado en un prototipo artesanal. Los resultados obtenidos servirán como punto de partida para el mejoramiento y, por qué no, para el posicionamiento del producto dentro del mercado de tecnologías innovadoras en agricultura urbana.

8.3.1. Evaluación de la producción de hongos en el huerto automatizado y el prototipo artesanal.

La recolección de los carpóforos tanto de la especie *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes* se realizó de manera manual con un cuchilla estéril y el peso de los carpóforos se determinó mediante una balanza analítica OHAUS PA124C de 120.000 g $\pm$ 0.0001 g ubicada en la Universidad El Bosque.

En la etapa productiva de cada especie se midieron componentes de rendimiento:

- a. La **precocidad** se evaluó teniendo en cuenta el tiempo transcurrido desde la siembra del micelio hasta la aparición de los primordios, en días. Los datos fueron tabulados y posteriormente graficados para su visualización.
- b. El **tiempo de cosecha** se determinó desde la siembra del micelio hasta la cosecha, en días. Los datos fueron tabulados y posteriormente graficados para su visualización.
- c. Las **medidas biométricas del carpóforo** se determinaron mediante un promedio de longitud del sombrero de los hongos en cada prototipo implementado. Se tomaron 5 muestras para poder comparar los promedios del tamaño del sombrero y se tabularon.
- d. La **eficiencia biológica** se determinó con los carpóforos cosechados de cada especie situada en el prototipo artesanal y el huerto automatizado. Se limpiaron los residuos del sustrato y se pesaron; en este caso se tuvo en cuenta el peso del sustrato en base seca y se empleó la ecuación 9.

$$\text{Eficiencia biológica (EB)} = \frac{\text{Masa de cuerpos fructíferos cosechados}}{\text{Masa inicial del sustrato en base seca}} \times 100$$

Ecuación 9. Evaluación de eficiencia biológica en shiitakes y orellanas cosechadas en el prototipo artesanal y el huerto automatizado.

* Las evaluaciones se realizaron para las especies *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes* en las dos cosechas que se lograron analizar.

8.3.2. Evaluación del consumo energético del prototipo de huerto automatizado

A continuación en la figura . se visualiza la conexión de las diferentes etapas del circuito. Para esto se dispuso de una fuente de 12V y regulador de 5V para poder alimentar el sistema a partir de 110V.

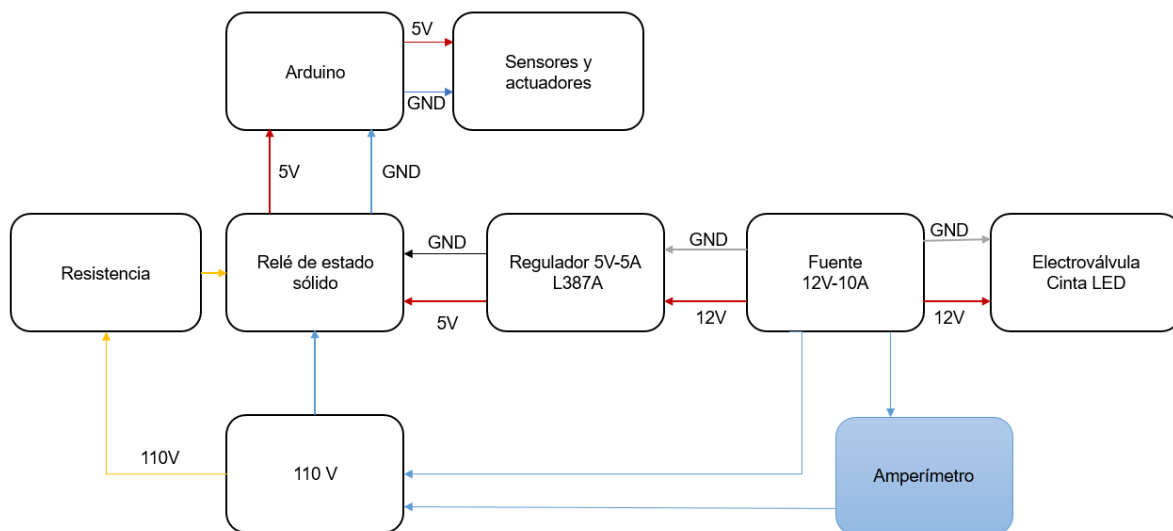


Figura 50. Evaluación del consumo energético del prototipo

A partir de las mediciones realizadas con un amperímetro se obtuvo un consumo máximo de corriente de **3A**.

8.3.3. Costo mensual de operación

Dada la corriente máxima que consume el sistema se realizaron los cálculos para determinar el consumo en KWh mensual del prototipo y el costo basándonos en el KWh promedio de una casa estrato 4 en Bogotá (Peña, 2012). Para esto se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Se determinó en la ecuación 10. cuántos amperios por hora se estaban consumiendo al día

$$Ah = \text{Corriente} \times \text{tiempo}$$

Ecuación 10. Amperios horas consumidos al día (Ah=Amperios por hora) (Peña, 2012).

Luego se determinó la potencia del sistema teniendo en cuenta la entrada de 110V y los amperios hora obtenidos al día:

$$Potencia = V \times I$$

Ecuación 11. Potencia del sistema dada por el voltaje del sistema y la corriente máxima de consumo (Peña, 2012).

Seguido a esto se calculó el costo teniendo en cuenta el precio del KWh en una vivienda estrato 4, ya que es donde se encuentra situado el dispositivo.

$$Consumo\ energético = Potencia\ al\ mes \times Precio\ del\ Kwh\ Promedio$$

Ecuación 12. Determinación del consumo energético del prototipo (Peña, 2012).

8.4. Fase 3: Desarrollo del manual de usuario

Esta fase recupera la información detallada indispensable para la operación y mantenimiento de la cámara de incubación y fructificación de hongos comestibles. Al diseñar y construir un prototipo funcional de huerto casero, se busca que el consumidor tenga completo manejo de este mismo y pueda realizar el inicio, la suspensión, el apagado del sistema, la configuración y el mantenimiento, entre muchas otras operaciones que se establecen en el manual de usuario.

9. RESULTADOS

9.1. Fase 0: Estudio de las condiciones que favorecen el crecimiento y desarrollo de los hongos y del lugar de ejecución dentro de la vivienda

A continuación se observan los resultados obtenidos del crecimiento de las especies de hongos en el prototipo artesanal implementado para *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*.

9.1.1 Cultivo de hongos

9.1.1.1 Obtención de los hongos.

Los hongos se obtuvieron gracias a la empresa Setas de Siecha ubicada en la finca Fungi y Flora en Macheta, Cundinamarca, Colombia.

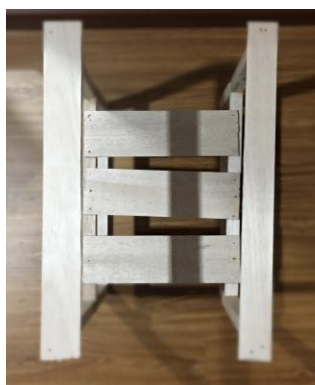
9.1.1.2 Implementación de un prototipo artesanal para el desarrollo de los hongos *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*.

En la tabla 17 se visualizan las medidas obtenidas para el diseño del prototipo artesanal basándonos en las medidas del sustrato de cada especie.

Medidas	Prototipo Shiitakes	Prototipo Orellanas
Ancho	38 cm	38 cm
Largo	30 cm	30 cm
Alto	45 cm	45 cm
Distancia de la parrilla al piso	20 cm	8 cm

Tabla 17. Medidas del prototipo artesanal para la ubicación de los hongos (Anaya & Coronado, 2019).

Obtenidas las medidas anteriormente tabuladas se implementó el prototipo artesanal que se observa en la figura 51 y 52 con el fin de evaluar el crecimiento de las dos especies (*Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*).



i) Vista superior del prototipo



ii) Vista lateral del prototipo



iii) Vista lateral del prototipo

desarrollado

artesanal

desarrollado.

Figura 51. Estructura en balsa del prototipo artesanal. (Anaya & Coronado, 2019).



iv) Vista frontal



v) Vista superior



vi) Vista lateral

Figura 52. Estructura en balsa del prototipo artesanal con recubrimiento de hule negro. (Anaya & Coronado, 2019).

9.1.1.3 Etapa de incubación

A continuación se observan los resultados obtenidos para la etapa de incubación en las especies *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*.

i. *Pleurotus ostreatus* (orellanas)

El sustrato escogido se encontraba colonizado desde hace un mes, esto se visualiza con la apariencia blanquecina de la bolsa. En esta etapa se controló de manera manual las variables de humedad relativa y temperatura para intentar mantenerlas en un rango de 70-80% y entre 24 a 26°C respectivamente. En la figura 53 se pueden observar la formación de los primordios (primer estadio del desarrollo de un hongo).



Figura 53. Primordios de *Pleurotus ostreatus* (orellanas) obtenidos en el prototipo artesanal. (Anaya & Coronado, 2019).

ii. *Lentinula edodes* (shiitakes)

El sustrato de *Lentinula edodes* se estaba colonizando desde hace dos meses, esto se visualiza con el consumo del sustrato. En esta etapa se controlaban de manera manual las variables de humedad relativa y temperatura para intentar mantenerlas en un rango de 70-80% y entre 21 a 27°C respectivamente. En la figura 54 se pueden observar la formación de los primordios (primer estadio del desarrollo de un hongo).

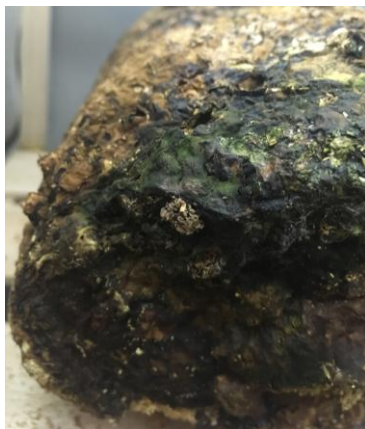


Figura 54. Primordios de *Lentinula edodes* (shiitakes) obtenidos en el prototipo artesanal. (Anaya & Coronado, 2019).

9.1.1.4 Etapa de fructificación

A continuación se observan los resultados obtenidos para la etapa de fructificación en las especies *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*.

i. *Pleurotus ostreatus* (orellanas)

Para la etapa de fructificación se estableció la humedad relativa lo más alta posible humedeciendo el ambiente de manera manual y se mantuvo a temperatura ambiente (oscilando entre 18-20°C). Se puede observar en la figura 55 el desarrollo de los cuerpos fructíferos.



Figura 55. Desarrollo de los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* (Anaya & Coronado, 2019).

ii. *Lentinula edodes* (shiitakes)

Para la etapa de fructificación de *Lentinula edodes* se estableció la humedad relativa lo más alta posible humedeciendo el ambiente de manera manual en el piso y las paredes se mantuvo a temperatura ambiente (oscilando entre 16-20°C). Se pueden observar en la figura 56 el desarrollo de los cuerpos fructíferos.



Figura 56. Desarrollo de los cuerpos fructíferos de *Lentinula edodes* (shiitakes) en el prototipo artesanal (Anaya & Coronado, 2019).

9.1.1.5 Etapa de cosecha

A continuación se observan los resultados obtenidos para la etapa de cosecha en las especies *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*.

i. *Pleurotus ostreatus* (orellanas)

Cuando se observaron los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* (orellanas) desarrollados se cortaron desde el estípite como se observa a continuación en la figura 59.



Figura 57. Cosecha de *Pleurotus ostreatus* en el prototipo artesanal
(Anaya & Coronado, 2019).

ii. *Lentinula edodes* (shiitakes)

Cuando se observaron los cuerpos fructíferos de *Lentinula edodes* desarrollados se cortaron desde el estípite como se observa a continuación en la figura 60.



Figura 58. Cosecha de *Lentinula edodes* en el prototipo artesanal (Anaya & Coronado, 2019).

9.1.2 Lugar de ejecución dentro de la vivienda

Se ubica la cámara de incubación y fructificación de hongos comestibles sobre el mesón de la cocina. Este último está construido en piedra triturada de granito. El granito es una roca compuesta por tres minerales principales que se encuentran en la naturaleza: cuarzo, feldespato y mica. Se caracteriza por ser dura y resistente, por lo que es muy utilizada en el sector de construcción. Su densidad media es de 2,75 g/cm³, con un rango de 1,74 a 2,80 g/cm³ (Perero Lainez, 2014), lo que se interpreta como un indicador de que el sustrato cuenta con buena estructura y volumen de huecos. El mesón se ubica encima de la armazón de hormigón armado en la cocina situada en la localidad de Usaquén. Las dimensiones del mesón son 50 cm de ancho, 54 de largo y 60 cm de profundidad. Se observa en la figura 61 que el espacio donde se sitúa el prototipo de huerta casera se encuentra al lado de una toma de corriente de 110V.

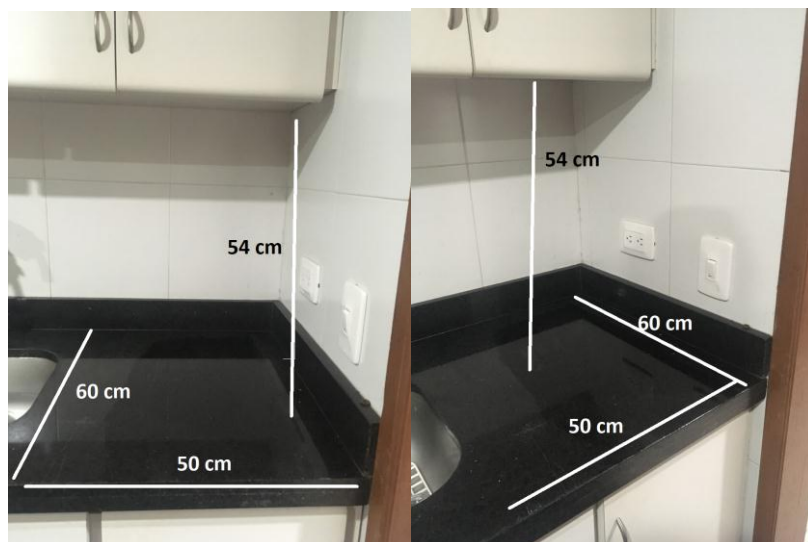


Figura 59. Mesón de cocina en la localidad de Usaquén (Anaya & Coronado, 2019).

Se elige la cocina como lugar de ejecución ya que es un lugar dentro de la vivienda que, por un lado, cuenta con condiciones higiénicas y sanitarias propicias para el crecimiento y desarrollo de los hongos y, por otro lado, porque queda a proximidad de varias llaves que permiten el acceso al agua (lavadero, lavaplatos) y, además, de tomas de corriente a 110V, las cuales proveen la alimentación del circuito eléctrico del sistema de monitoreo y control. Adicionalmente, es el lugar idóneo para tener un alimento y exhibir socialmente el huerto automatizado.

9.2 Fase 1: Construcción del prototipo automatizado para el desarrollo y crecimiento de los hongos.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la fase 1 de la construcción del huerto automatizado para las especies *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*.

9.2.1. Selección de componentes a utilizar para el sistema de monitoreo y control.

Los componentes escogidos fueron evaluados anteriormente comparando diferentes dispositivos a utilizar y seleccionando los que más se ajustaban a las características del sistema. En la tabla siguiente se pueden observar

	Variable	Componente escogido
Sensores	Temperatura y humedad relativa	DHT-22
	Humedad del suelo	YL-69
	Sensor de luz	Tipo GL55
	Resistencia calefactora 30cm, 30 W, 110V AC.	Tipo estufa
	Ventilador sunflow 5V	sunflow 5V

Actuadores	Riego	Humidificador 24V
	Iluminación	Cinta led 12V
Sistema de Alerta	Módulo WiFi	ESP32
Microcontrolador	Arduino	Mega

Tabla 18. Componentes escogidos para el huerto automatizado.

9.2.2 Calibración de los sensores

9.2.2.1 Sensor DHT22

A continuación se observan las tablas obtenidas de las seis temperaturas analizadas (5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C). Estos datos fueron obtenidos cada 5 minutos del termómetro y del sensor DHT-22 (Anaya & Coronado, 2019).

	Temperatura 5°C			Temperatura 10°C			Temperatura 15°C		
	Termómetro	DHT-22	Baño térmico	Termómetro	DHT-22	Baño térmico	Termómetro	DHT-22	Baño térmico
	5.008	6.113	5.12	10.001	11.113	10.14	15.001	15.252	15.00
	5.009	5.119	5.12	10.005	10.995	10.15	15.005	16.152	15.14
	5.013	5.998	5.12	9.993	11.001	10.16	15.004	16.002	15.15
	5.011	5.099	5.12	10.009	11.010	10.14	15.007	16.001	15.14
	5.012	5.104	5.12	10.005	10.859	10.14	15.003	15.125	15.16
<i>Pro me dio</i>	5.011	5.487	5.12	10.003	10.996	10.15	15.004	15.706	15.12
<i>Des v. Std .</i>	0.002	0.521	0	0.006	0.090	0	0.002	0.479	0
	Temperatura 20°C			Temperatura 25°C			Temperatura 30°C		

	Termómetro	DHT-22	Baño térmico	Termómetro	DHT-22	Baño térmico	Termómetro	DHT-22	Baño térmico
	19.999	20.998	20.14	25.001	25.122	25.19	29.998	30.115	30.19
	20.001	21.001	20.15	25.011	26.012	25.18	30.001	31.012	30.20
	20.002	21.998	20.15	25.001	25.998	25.17	30.002	31.005	30.20
	20.005	20.005	20.15	25.002	25.985	25.20	30.008	30.994	30.30
	20.000	20.987	20.15	25.003	26.001	25.15	30.011	30.215	30.20
<i>Pro me dio</i>	20.001	20.998	20.15	25.004	25.824	25.18	30.004	30.668	30.22
<i>Des v. Std .</i>	0.002	0.705	0	0.004	0.392	0	0.005	0.461	0

Tabla 19. Registro de las temperaturas tomadas cada 5 minutos del termómetro y el sensor DHT-22 (Anaya & Coronado, 2019).

Temperatura (°C)		
Temperatura (°C)	Patrón	DHT-22
5	5.011	5.487
10	10.003	10.996
15	15.004	15.706
20	20.001	20.998
25	25.004	25.824
30	30.004	30.668

Tabla 20. Promedios de cada lectura en el termómetro de referencia y el sensor DHT-22 (Anaya & Coronado, 2019).

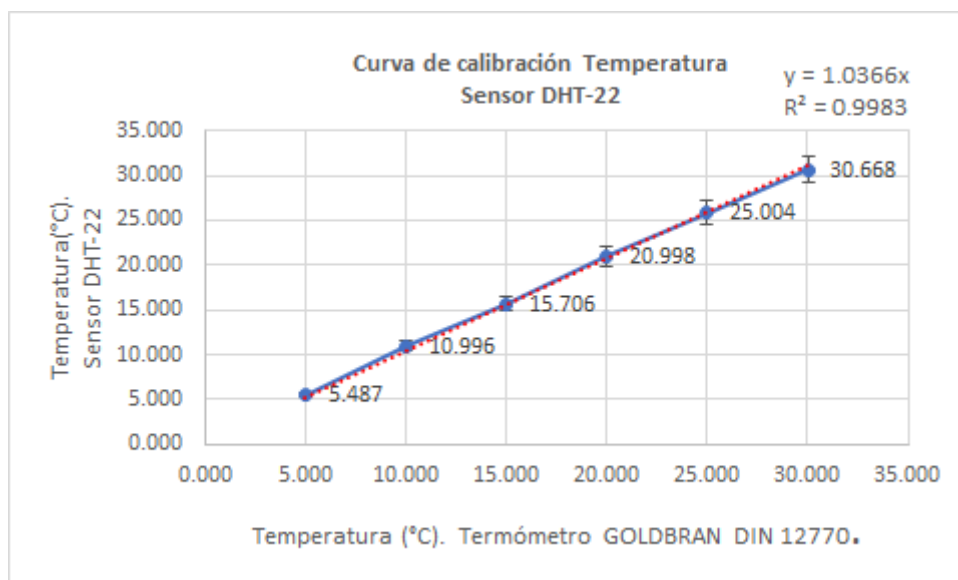


Figura 60. Gráfica de calibración del sensor DHT-22 (Anaya & Coronado, 2019).

	Temperatura 19°C					
	5 minutos		10 minutos		15 minutos	
	Humedad sensor dfd	Humedad sensor DHT-22	Humedad sensor dfd	Humedad sensor DHT-22	Humedad sensor dfd	Humedad sensor DHT-22
	42.045	45.214	42.656	44.265	41.995	44.235
	42.125	44.994	42.123	44.264	41.885	44.248
	42.125	45.002	41.998	44.264	42.987	44.258
Promedio	42.098	45.070	42.259	44.264	42.289	44.247
Desv. Std.	0.046	0.125	0.349	0.001	0.607	0.012
	20 minutos		25 minutos		30 minutos	
	Humedad sensor dfd	Humedad sensor DHT-22	Humedad sensor dfd	Humedad sensor DHT-22	Humedad sensor dfd	Humedad sensor DHT-22

	42.456	44.238	43.456	45.975	43.546	45.987
	42.116	44.265	43.452	45.987	43.568	45.781
	42.452	44.255	42.998	45.787	43.578	45.988
Promedio	42.341	44.253	43.302	45.916	43.564	45.919
Desv. Std.	0.195	0.014	0.263	0.112	0.016	0.119

Tabla 21. Registro de las humedades relativas cada 5 minutos del higrómetro y el sensor DHT-22 (Anaya & Coronado, 2019).

Sensor de referencia	DHT-22
42.098	45.070
42.259	44.264
42.289	44.247
42.341	44.253
43.302	45.916
43.564	45.919

Tabla 22. Promedios de cada lectura del sensor de referencia y el DHT-22 (Anaya & Coronado, 2019). .

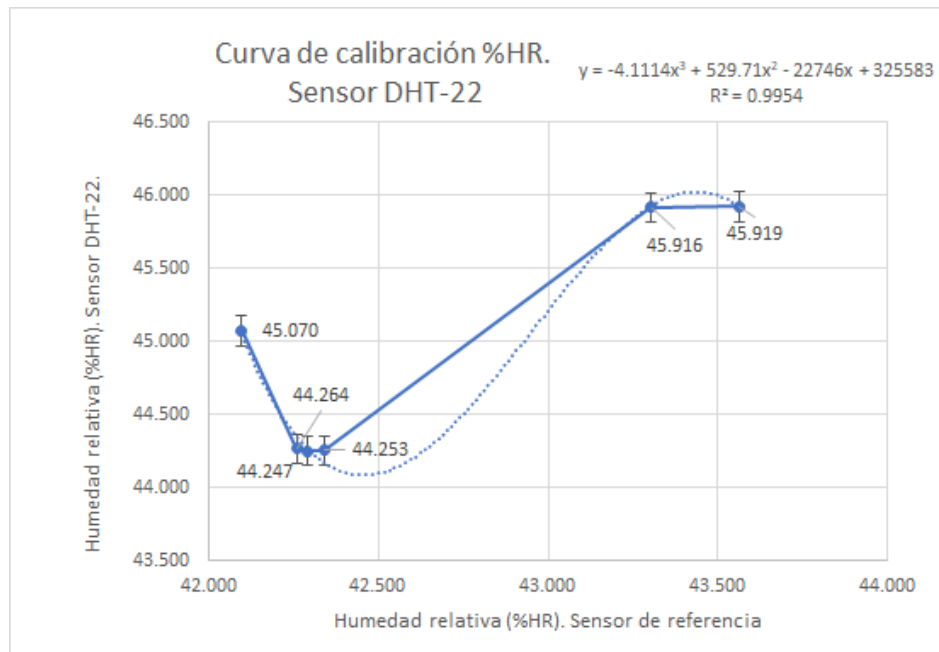


Figura 61. Gráfica de calibración de humedad relativa del sensor DHT-22 (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.2.2. Sensor YL-69

	Desconectado		Seco	
	Sensor Ref	Sensor YL-69	Sensor Ref	Sensor YL-69
	1000.002	990.254	825.001	815.125
	1000.001	990.245	824.997	815.129
	999.994	990.256	825.004	815.132
Promedio	999.999	990.252	825.001	815.129
Desv. Std.	0.004	0.006	0.004	0.004
	Húmedo		Muy húmedo	
	Sensor Ref	Sensor YL-69	Sensor Ref	Sensor YL-69

	648.123	645.165	154.004	135.154
	648.129	644.999	154.001	135.159
	648.131	645.164	153.994	135.167
Promedio	648.128	645.109	154.000	135.160
Desv. Std.	0.002	0.039	0.004	0.005

Tabla 23. Registro de las humedades del sustrato cada 5 minutos del higrómetro y el sensor YL-69 (Anaya & Coronado, 2019). .

Sustrato	Sensor Ref	Sensor YL-69
Desconectado	999.999	990.252
Seco	825.001	815.129
Húmedo	648.128	645.109
Muy Húmedo: En agua	154.000	135.160

Tabla 24. Promedios de cada lectura del sensor de referencia y el YL-69 (Anaya & Coronado, 2019). .

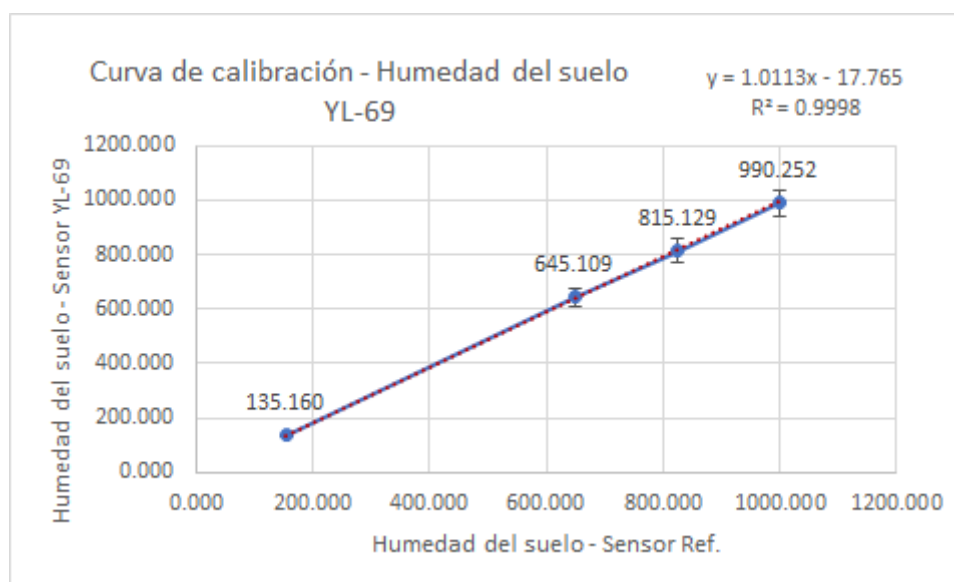


Figura 62. Gráfica de calibración de humedad relativa del sensor YL-69 (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.3 Sistema de monitoreo

Las pruebas de los sensores que se utilizan en la etapa de monitoreo se realizan en el Laboratorio de Electrónica de la Universidad El Bosque. Esto debido a que se utilizan dispositivos electrónicos tales como un generador de funciones, un osciloscopio digital, un multímetro digital y un computador con el software Arduino.

9.2.3.1 Temperatura y humedad relativa

A partir de la tabla 9, se decide elegir el sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 ya que de los tres sensores comparados, presenta las mejores características para el uso en la cámara de incubación y fructificación de los hongos comestibles. En efecto, su rango de medición de temperatura va de -40 a 80°C con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, por lo que abarca desde las temperaturas más bajas hasta las más altas teniendo un mejor control de esta. Igualmente, el rango de medición de la humedad relativa es 0 - 100% con una precisión de $\pm 2\%$ a $\pm 5\%$ mayor a la del SHT71 y SHT75. Finalmente, su frecuencia de muestreo (cada 2 segundos) mientras realiza la medición de las variables simultáneamente y su bajo precio lo figuran como el sensor más apto para este proyecto.

El sensor de temperatura y humedad relativa DHT22, previamente calibrado, se prueba exitosamente con respecto al higo-termómetro Extech RH101. Se programa en el IDE de Arduino y se le suministra un voltaje de 5V provenientes del Arduino Mega. Se consigue como salida, una señal calibrada y digital proveniente del pin D7. Se perciben datos cuantificables de temperatura y humedad relativa en el monitor serial de Arduino. Las mediciones se toman cada segundo. Se debe tener en cuenta que el sensor tiene una incertidumbre de 0.5% . Durante pruebas en el Laboratorio de Electrónica, se miden la temperatura y la humedad relativa y se obtienen los resultados de la figura 65 demostrando así que el sensor DHT22 detecta ambas variables físicas de forma adecuada.



Figura 63. Datos de salida del sensor DHT22 desde el monitor serial de Arduino. (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.3.2 Humedad del suelo

A partir de la tabla 10, se determina que los sensores dieléctricos o de capacitancia son los mejores en este tipo de proyectos ya que, primero, la distancia de detección de la humedad

se puede dar a menos de 1 cm del borde de las sondas, segundo, el rango de medición abarca desde 0% hasta 100% y, tercero, el tiempo de respuesta es del orden de milisegundos. Para el monitoreo de la humedad de suelo, se selecciona el sensor de humedad de suelo o higrómetro YL-69, el cual es un sensor capacitivo. Cuenta con dos terminales separados adecuadamente y un módulo YL-38 que contiene un circuito comparador LM393 SMD muy estable, un led de encendido y otro de activación de salida digital. Además, de 2 pines de conexión hacia el módulo YL-69, 2 pines para la alimentación y 2 pines de datos. VCC, GND, D0, A0. El sensor se alimenta a un voltaje de 3.3V a 5V, a una corriente de 35 mA. Consta de una sensibilidad alta; una profundidad de detección de 37 mm y trabaja a una temperatura de entre 10 °C a 30 °C (Fecegypt, s.f.).

El sensor de humedad del suelo YL-69 se conecta a un voltaje de 5V provenientes del Arduino Mega 2560. La señal de salida es una señal analógica proveniente del pin A7. A partir del programa realizado en Arduino, se tiene que, a diferentes umbrales cuantitativos, el módulo emite una respuesta cualitativa. Como ejemplo, si el valor de la humedad del sustrato es mayor o igual a 1000, la salida es “Sensor no está en el sustrato o está desconectado” (Remitirse a Metodología). Las mediciones se toman cada segundo. Se debe tener en cuenta que el sensor maneja una incertidumbre del 2% al 5%. Para probar el sensor, se realizan las pruebas utilizando una fuente de agua, un material que se humidificara y se obtienen los resultados que se observan en el monitor serial de Arduino de la Figura 64

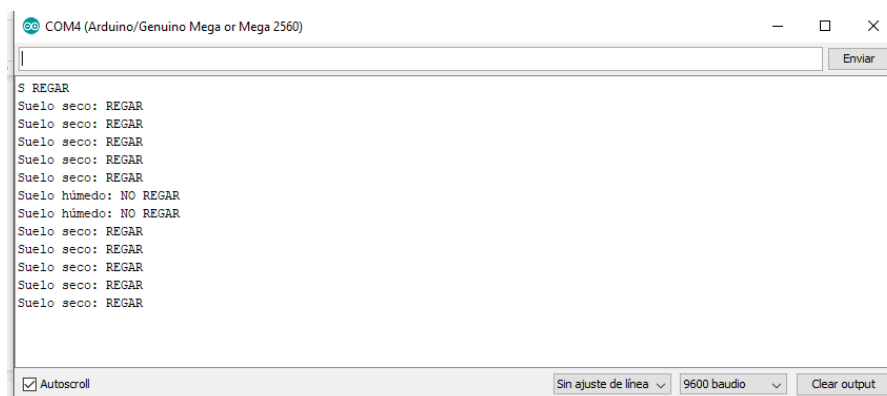


Figura 64. Datos de salida del sensor YL69 desde el monitor serial de Arduino. (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.3.3 Sensor de luz

Se decide utilizar un módulo de sensor fotorresistente o light-dependent resistor, en inglés (LDR ya que es un sensor que permite obtener medidas cuantitativas sobre el nivel de luz, tanto en interiores como en exteriores y permite conocer dicha medida en un tiempo de respuesta muy corto. En efecto, para la cámara de incubación y fructificación de shiitake y orellanas, se busca encender una luz LED cuando exista un bajo nivel de luz, el cual será sensado por el LDR con ayuda de la fotorresistencia de tipo GL55 que se ubica en el módulo del sensor de luz.

El sensor de luz LDR se prueba apagando y encendiendo la luz dentro de un ambiente de la vivienda. Se conecta al voltaje generado por el Arduino Mega 2560 de 5V. En efecto, se programa el sensor para que detecte la intensidad de la luz bajo la forma de una señal de salida analógica que se encuentre entre valores de 0 a 5V. El LDR permite el paso de voltajes más altos siempre que haya una intensidad de luz alta y voltaje más bajos cuando está oscuro. Enseguida, el Arduino convierte esta señal analógica en una señal digital entre lo

siguientes valores: 0 a 1023. En el programa de Arduino se establece que si el valor es estrictamente mayor a 600 nm, se enciendan las LEDS, de lo contrario, se apaguen.

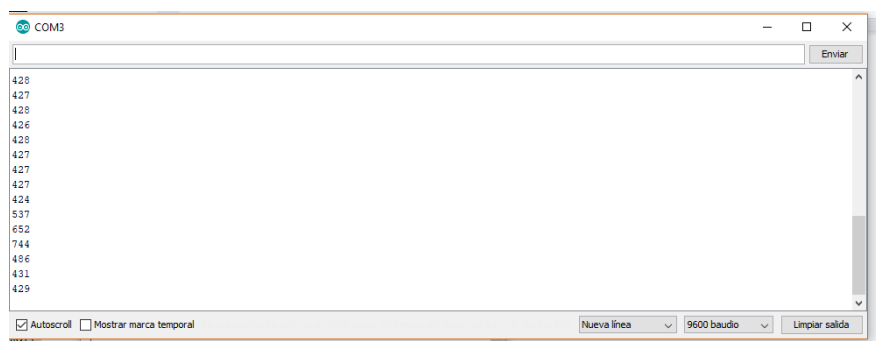


Figura 65. Datos de salida del módulo LDR desde el monitor serial de Arduino. (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.4 Sistema de control

9.2.4.1 Selección del sistema de control

A partir de la tabla de comparación de diferentes sistemas de control (Remitirse a Metodología) y el marco teórico, se selecciona un sistema de control ON/OFF de lazo cerrado. En efecto, se selecciona

ya que, por un lado, la planta o el sistema, es decir la cámara de incubación y fructificación propuesta, necesita mantener las variables físicas dentro de condiciones de referencia preestablecidas. Así pues, el sistema de control por ON/OFF permite tomar decisiones con respecto a umbrales deseados de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo y radiación lumínica mediante la activación o desactivación de los actuadores, siendo estos, el sistema de calefacción, de ventilación, de riego y de iluminación, respectivamente. Por otro lado, la planta requiere de una retroalimentación, la cual se origina a partir de las salidas de los sensores. Es decir, si los valores sensados sobrepasan los umbrales establecidos, los actuadores deben ajustar el sistema con el fin de mantener las variables dentro de los rangos de referencia. El sistema se encuentra entonces en constante retroalimentación, por lo que se dice de lazo cerrado. Los valores de referencia para cada variable física y el tiempo de establecimiento de cada una de ella se muestran en la tabla 25.

Variable física	Umbral	Actuador	Tiempo de establecimiento
Temperatura	> 24°C	Apagar resistencia de calefacción	2s ± 0.5%
	= 24°C	Apagar resistencia de calefacción	2s ± 0.5%
	< 24°C	Encender resistencia de calefacción.	2s ± 0.5%

Humedad relativa	>80	Encender el ventilador y extractor.	2s $\pm$ 2 - 5%
	=80	Apagar el ventilador y extractor.	2s $\pm$ 2 - 5%
	<80	Apagar el ventilador y extractor.	2s $\pm$ 2 - 5%
Humedad del sustrato	> 60 - 80%	Apagar el humidificador.	2s $\pm$ 5%
	= 60 - 80%	Apagar el humidificador.	2s $\pm$ 5%
	<60 -80%	Encender el humidificador.	2s $\pm$ 5%
Nivel de luminosidad	> 600 nm	Apagar cintas LED	3s $\pm$ 5%
	< 600 nm	Apagar cintas LED	3s $\pm$ 5%

Tabla 25. Activación de los actuadores para la incubación (Adaptado de Raja et al., 2018)

Variable física	Umbral	Actuador	Tiempo de establecimiento
Temperatura	> 18°C	Apagar resistencia de calefacción	2s $\pm$ 0.5%
	= 18°C	Apagar resistencia de calefacción	2s $\pm$ 0.5%
	< 18°C	Encender resistencia de calefacción.	2s $\pm$ 0.5%
Humedad relativa	>95	Encender el ventilador y extractor.	2s $\pm$ 2 - 5%
	=95	Apagar el ventilador y extractor.	2s $\pm$ 2 - 5%
	<95	Apagar el ventilador, extractor.	2s $\pm$ 2 - 5%
Humedad del sustrato	> 80 - 100%	Apagar el humidificador.	2s $\pm$ 5%
	= 80 - 100%	Apagar el humidificador.	2s $\pm$ 5%

	<80 -100%	Encender el humidificador.	2s $\pm$ 5%
Nivel de luminosidad	> 600 nm	Encender cintas LED	3s $\pm$ 5%
	< 600 nm	Apagar cintas LED	3s $\pm$ 5%

Tabla 26. Activación de los actuadores para la fructificación(Adaptado de Raja et al., 2018)

9.2.4.2 Sistema de calefacción

Como un indicador del funcionamiento de la resistencia térmica, se observa que la LED del relé de estado sólido se alumbra, lo que significa que la señal que entrada por el CH 1 se ha recibido correctamente. En el prototipo final, se realiza un control ON/OFF para el sistema de calefacción. Se obtienen resultados que indican que existe un control de las temperaturas deseadas dentro la cámara de incubación y fructificación de los hongos comestibles.

a. *Pleurotus ostreatus* (orellanas)

Para la etapa de incubación, se grafican los datos de salida, es decir la temperatura obtenida durante la acción de control de la resistencia de calefacción, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 66.

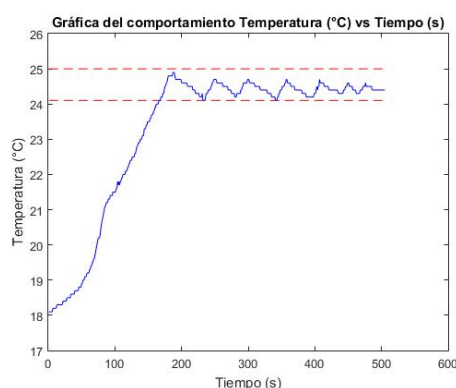


Figura 66. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 67, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la Temperatura (°C) vs. el Tiempo (s) de la figura 68.

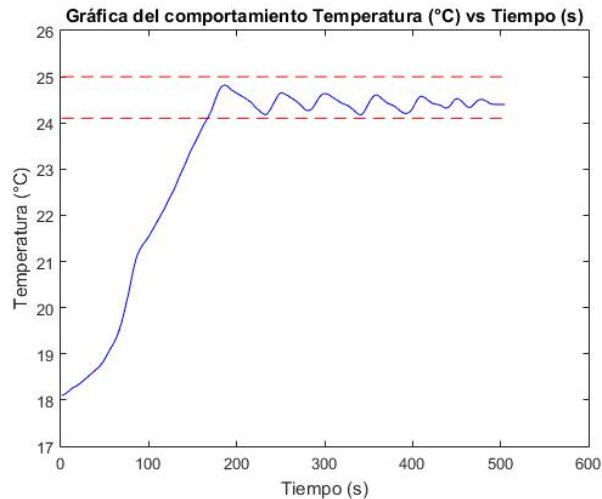


Figura 67. Gráfica suavizada del comportamiento de la Temperatura vs Tiempo en orellanas (Anaya & Coronado, 2019).

La figura 67, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el comportamiento de la temperatura vs. el tiempo de la gráfica 68 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

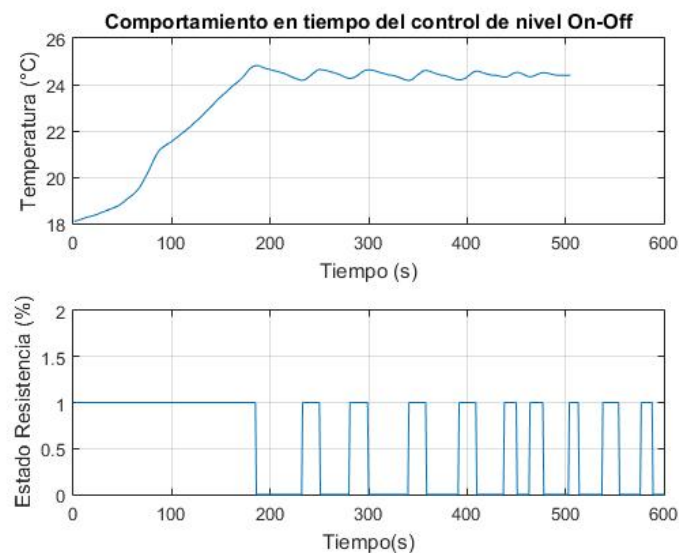


Figura 68. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de calefacción, se llega a una función de transferencia de segundo orden para la temperatura del sistema, la cual se indicará a continuación :

$$\frac{5.699e-06}{s^2 + 0.009857 s + 6.462e-05}$$

Ecuación 13. Función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas (Anaya & Coronado, 2019).

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta dos polos y cero ceros. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 69) .

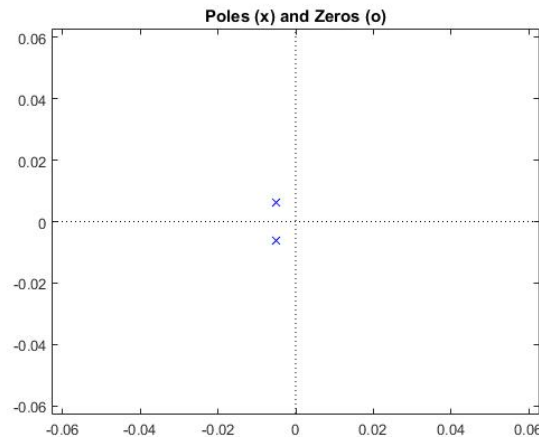


Figura 69. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas. (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 70).

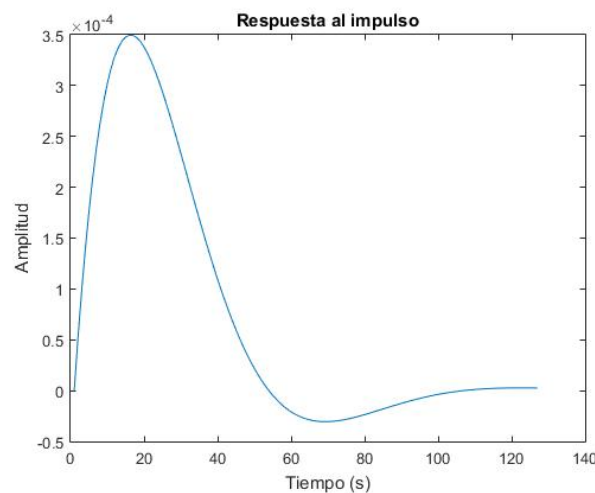


Figura 70. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas (Anaya & Coronado, 2019).

Para la etapa de fructificación, se grafican los datos de salida, es decir la temperatura obtenida durante la acción de control de la resistencia de calefacción, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 71.

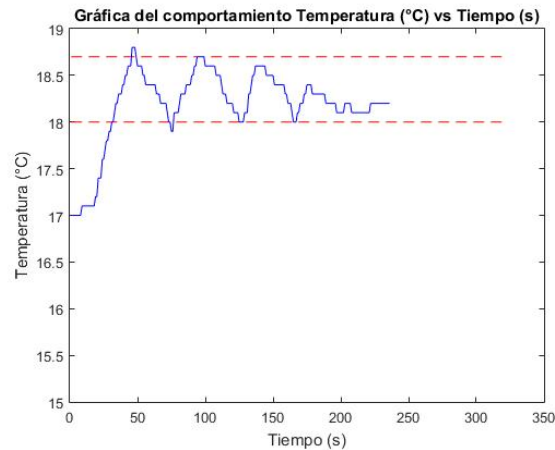


Figura 71. Comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas en fructificación
(Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 72, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la Temperatura (°C) vs. el Tiempo (s) de la figura 71.

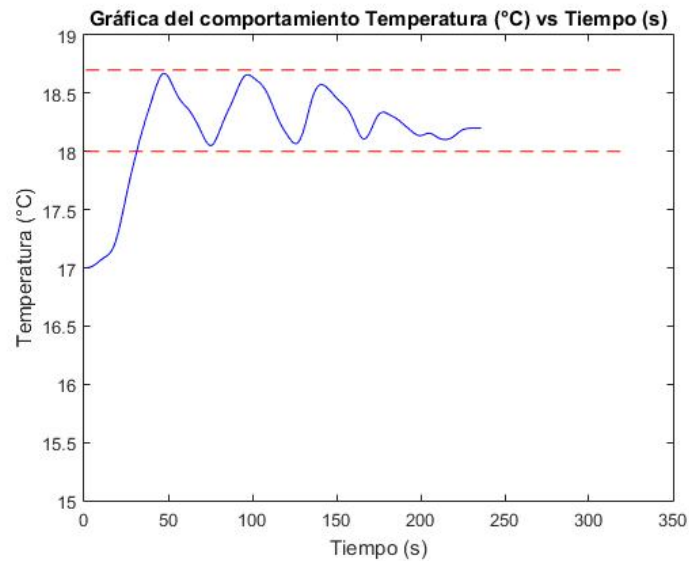


Figura 72. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas suavizada para la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 72, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el el comportamiento de la temperatura vs. el tiempo de acción de la gráfica 73 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

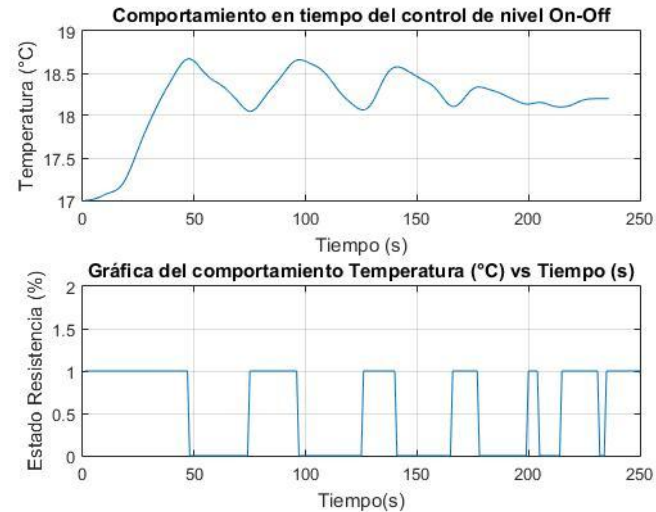


Figura 73. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de calefacción, se llega a una función de transferencia de segundo orden para la temperatura del sistema, la cual se indicará a continuación :

$$6.59e-05$$

$$s^2 + 3.732 s + 6.024e-09$$

Ecuación 14. Función de transferencia del comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la fructificación.

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta dos polos y cero ceros. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 74) .

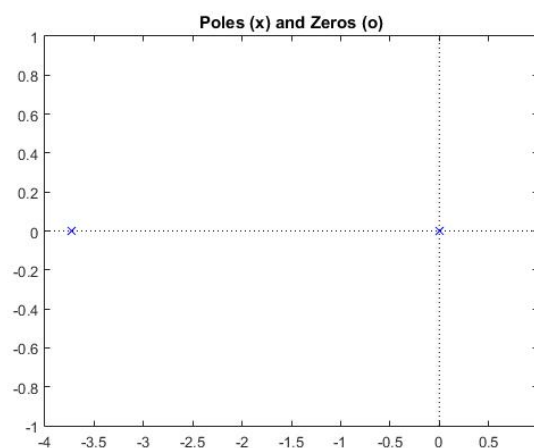


Figura 74. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas en la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 75).

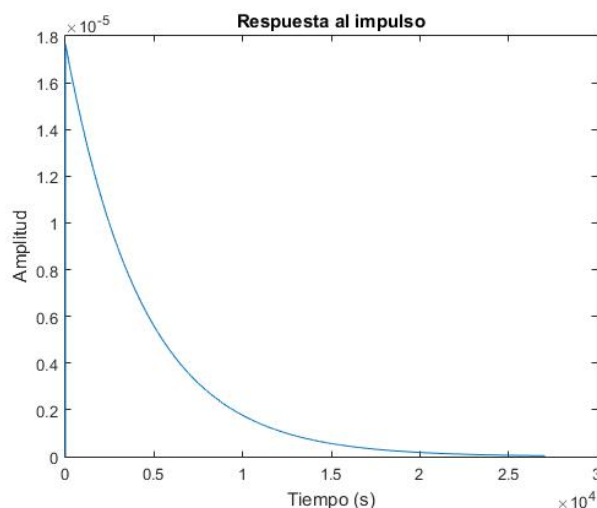


Figura 75. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en orellanas en la fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

b. *Lentinula edodes* (shiitakes)

Para la etapa de incubación, se grafican los datos de salida, es decir la temperatura obtenida durante la acción de control de la resistencia de calefacción, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 78.

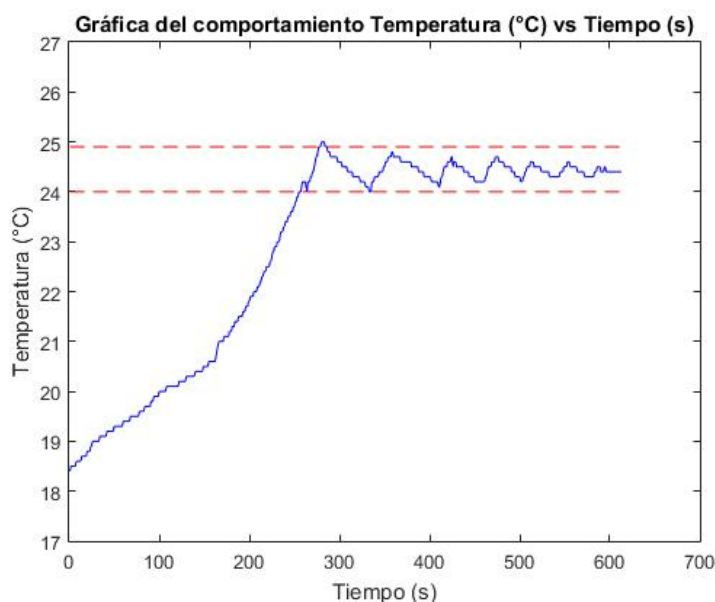


Figura 76. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 76 se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la Temperatura (°C) vs. el Tiempo (s) de la figura 77.

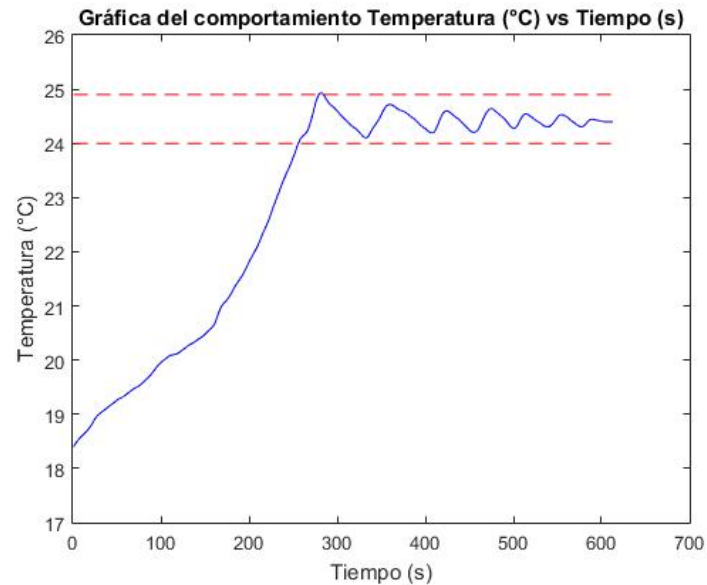


Figura 77. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo suavizada en shiitakes para la incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 77, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el comportamiento de la temperatura vs. el tiempo de acción de la gráfica 78 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

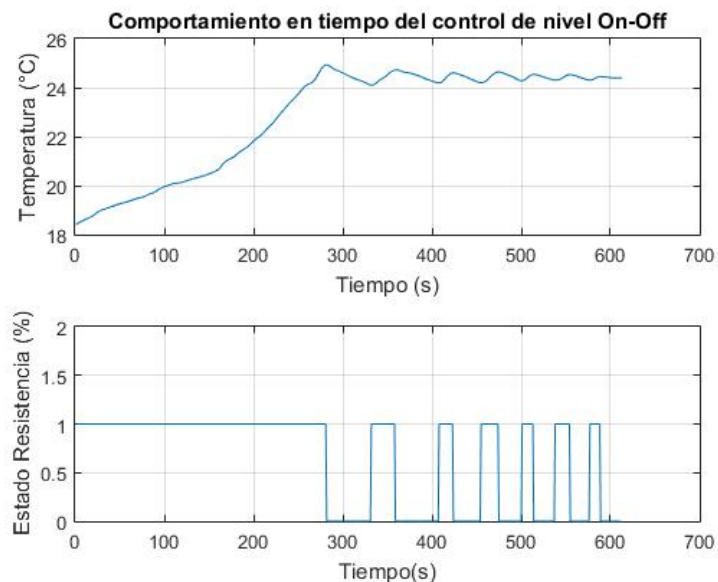


Figura 78. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de calefacción, se llega a una función de transferencia de segundo orden para la temperatura del sistema, la cual se indicará a continuación :

$$\frac{9.187e-06}{s^2 + 0.2466 s + 3.422e-07}$$

Ecuación 15. Función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la incubación

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta dos polos y cero. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 79) .

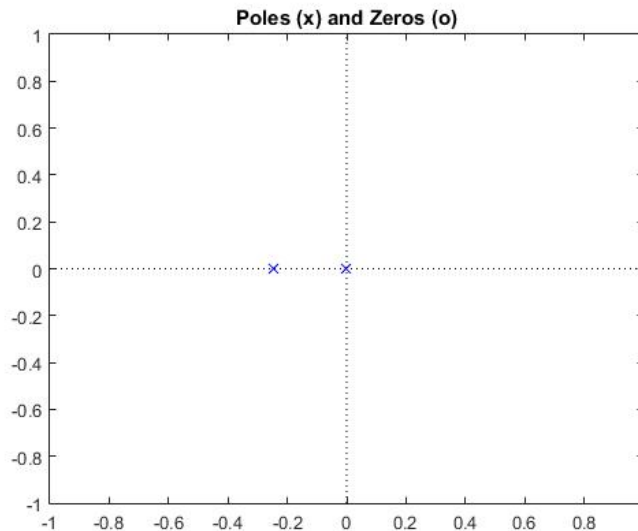


Figura 79. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 80).

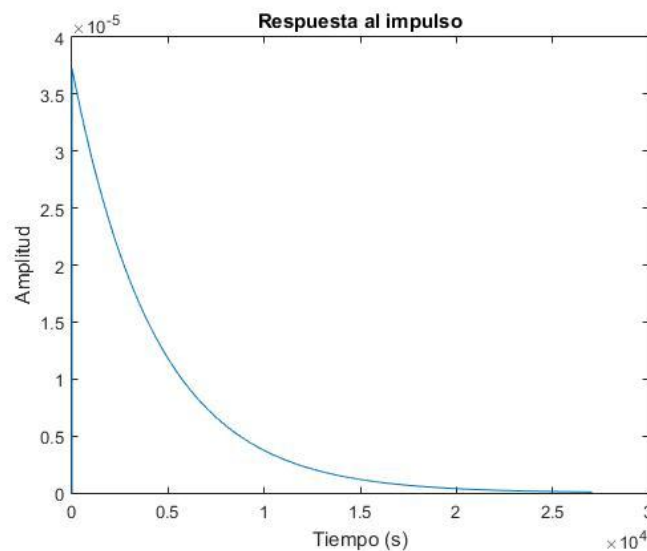


Figura 80. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

Para la etapa de fructificación, se grafican los datos de salida, es decir la temperatura obtenida durante la acción de control de la resistencia de calefacción, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 81.

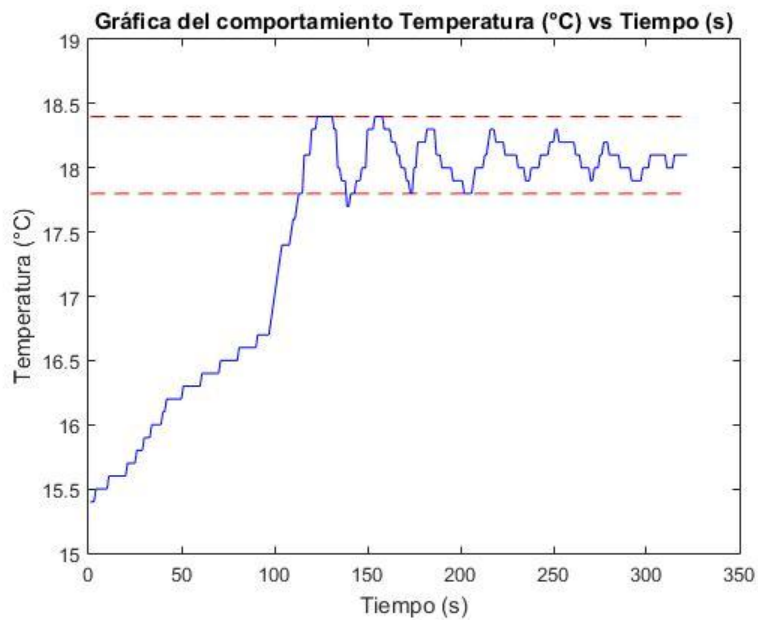


Figura 81. Comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en fructificación.
(Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 82, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la Temperatura (°C) vs. el Tiempo (s) de la figura 81.

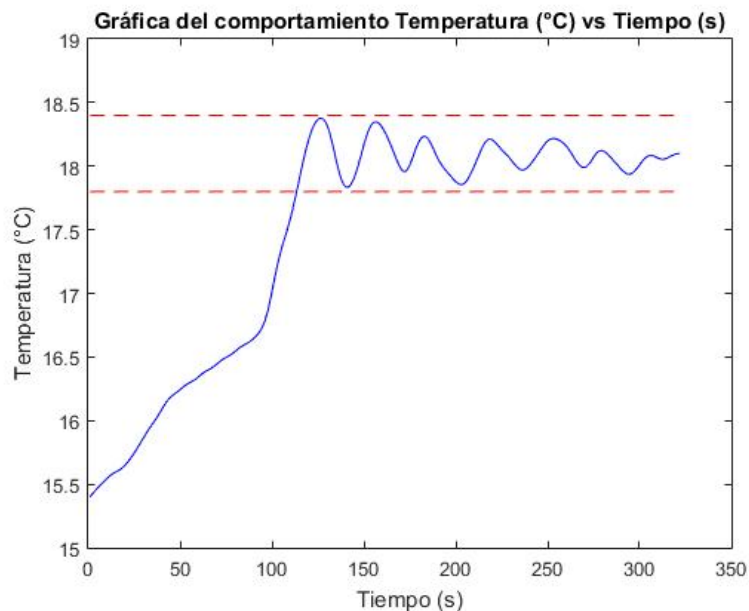


Figura 82. Gráfica del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes suavizada para la fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 82, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el comportamiento de la temperatura vs. el tiempo de acción de la gráfica 83 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

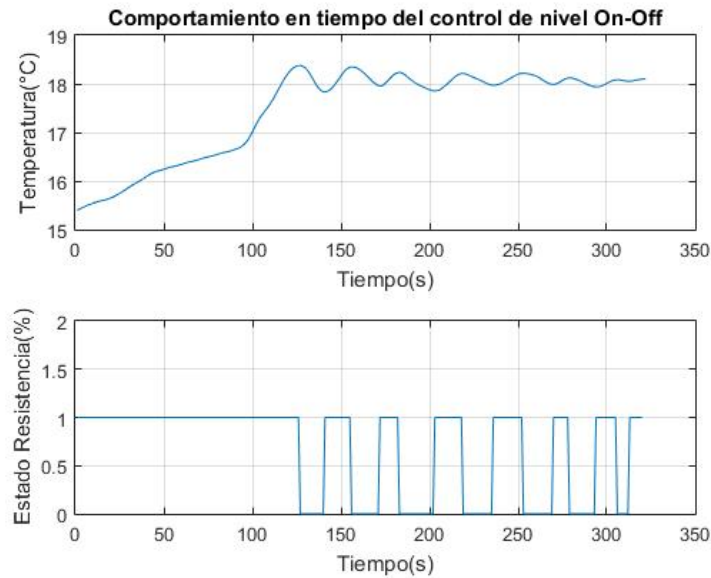


Figura 83. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de calefacción, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la temperatura del sistema, la cual se indicada a continuación.

$$\frac{2.992e-05}{s^2 + 0.6076 s + 6.507e-09}$$

Ecuación 16. Función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la fructificación

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta presenta dos polos y un cero. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 84) .

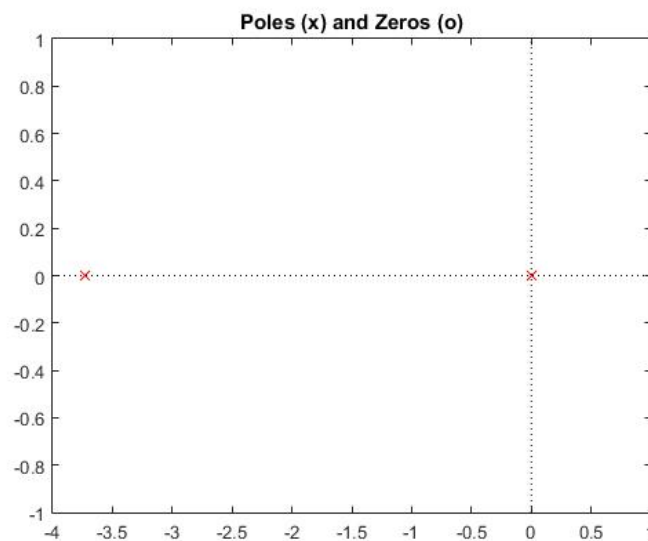


Figura 84. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 87).

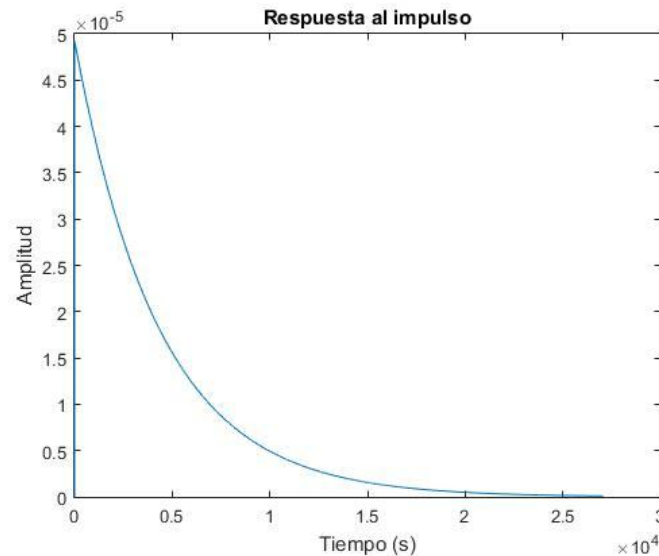


Figura 85. Respuesta al impulso del comportamiento temperatura vs tiempo en shiitakes en la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.4.3 Sistema de ventilación

a. *Pleurotus ostreatus* (orellanas)

Para la etapa de incubación, se grafican los datos de salida, es decir la HR obtenida durante la acción de control del ventilador y del extractor, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 86.

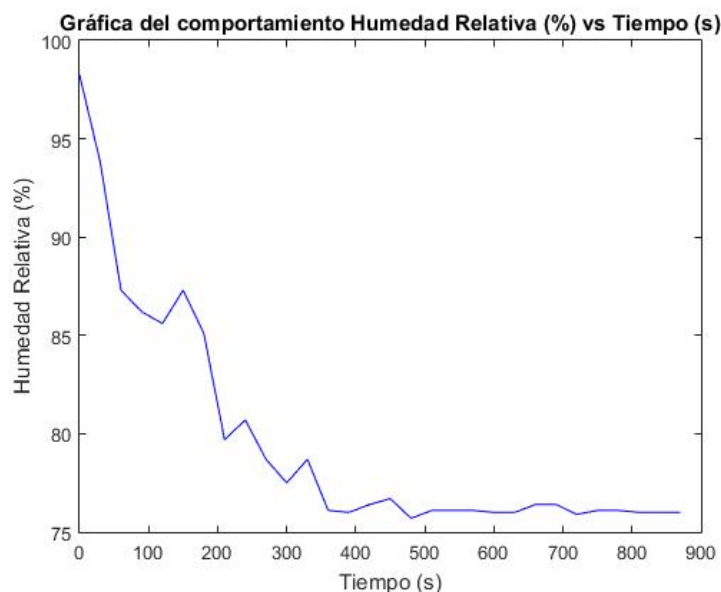


Figura 86. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 87, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la HR (%) vs. el Tiempo (s) de la figura 86.

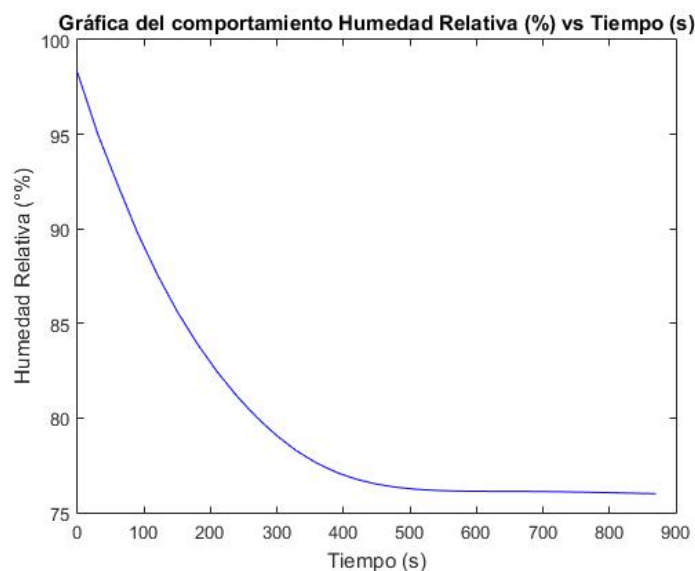


Figura 87. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo suavizada en orellanas para la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 87, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el comportamiento de la HR vs. el tiempo de acción de la gráfica 88 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

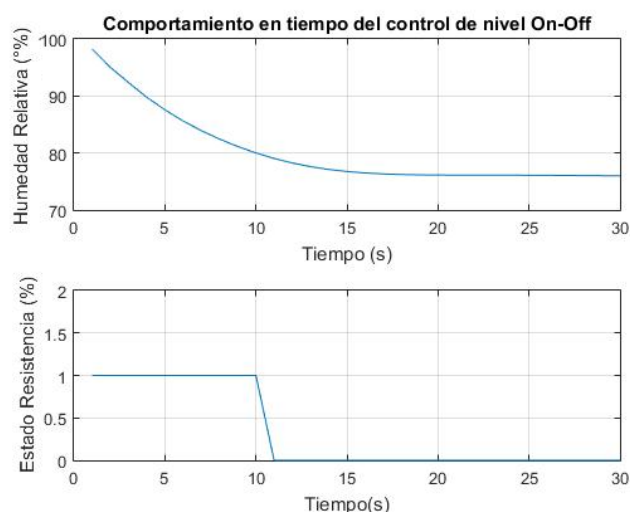


Figura 88. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de calefacción, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la HR del sistema, la cual se indicada a continuación.

$$\frac{0.008871}{s^2 + 0.04075 s + 0.001257}$$

Ecuación 17. Función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas para la incubación

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta dos polos y cero ceros. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 89) .

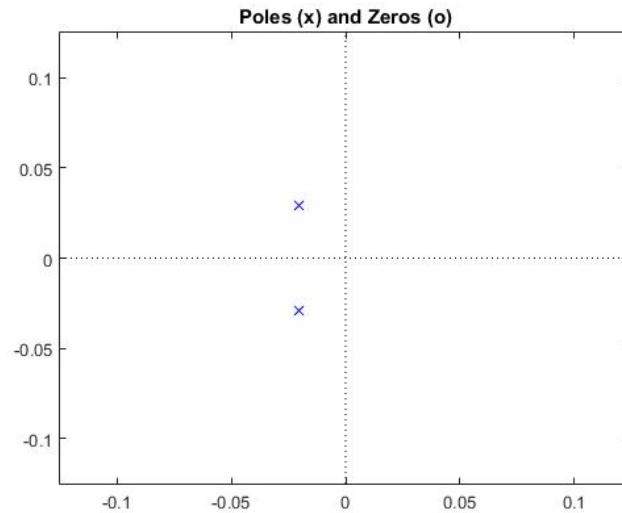


Figura 89. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 90).

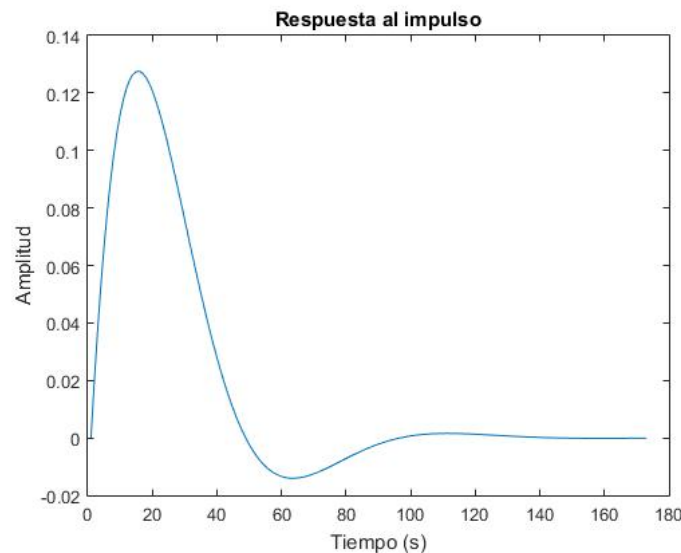


Figura 90. Respuesta al impulso del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

Para la etapa de fructificación, se grafican los datos de salida, es decir la HR obtenida durante la acción de control del ventilador y del extractor, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 91.

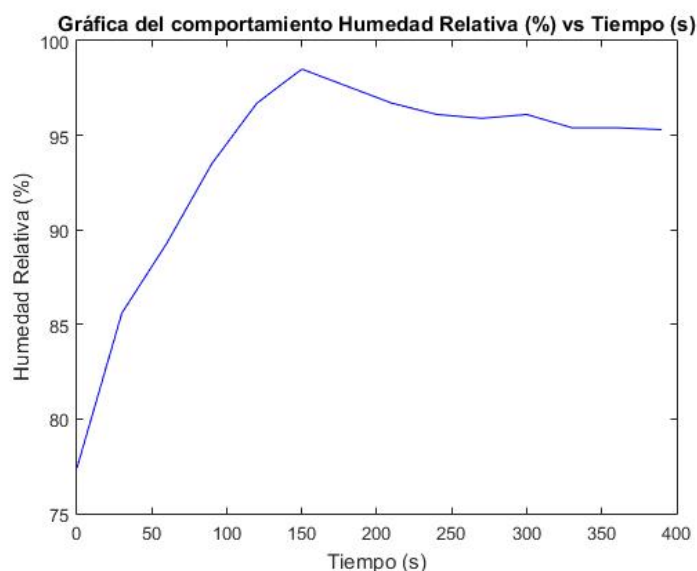


Figura 91. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 92, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la HR (%) vs. el Tiempo (s) de la figura 91.

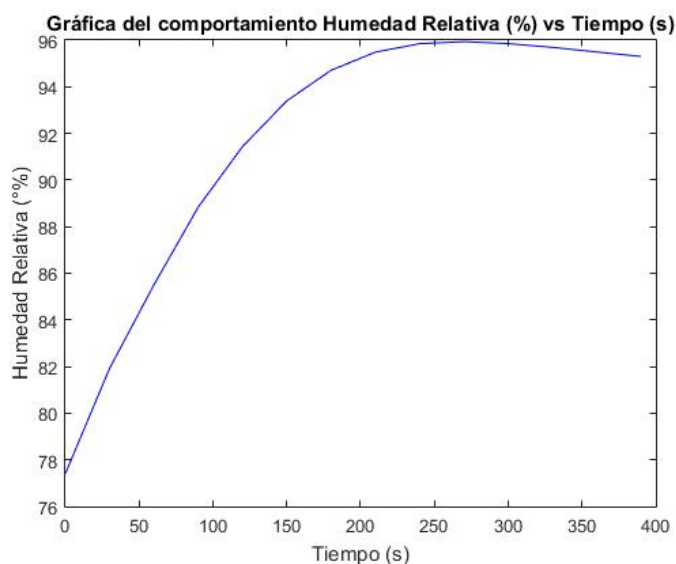


Figura 92. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas suavizada en fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 92, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el comportamiento de la HR vs. el tiempo de acción de la gráfica 93 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

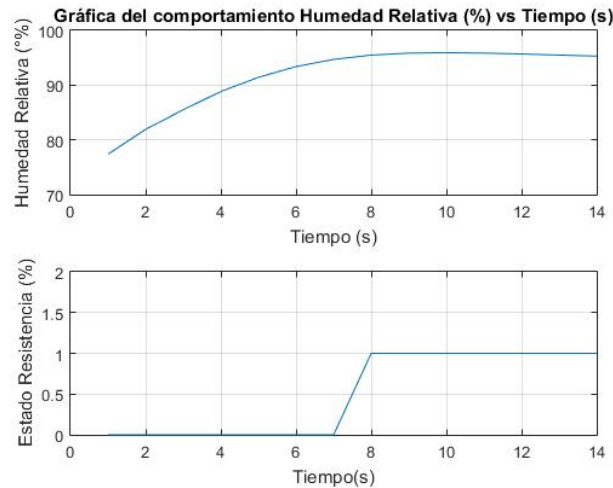


Figura 93. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de calefacción, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la HR del sistema, la cual se indicada a continuación.

$$\frac{0.001816 s + 9.109e-05}{s^2 + 0.04377 s + 1.223e-09}$$

Ecuación 18. Función de transferencia del *comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en fructificación*

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta presenta dos polos y un cero. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 94) .

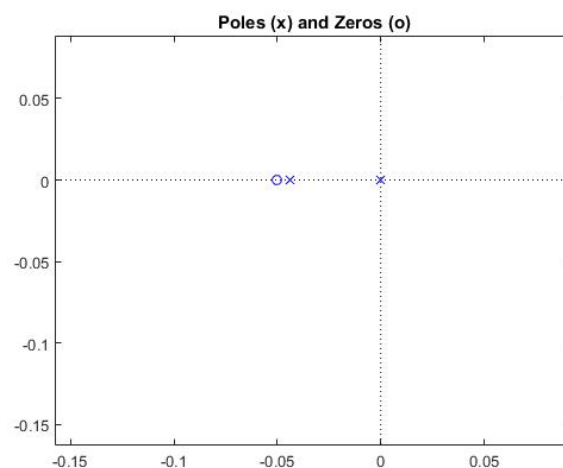


Figura 94. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 95).

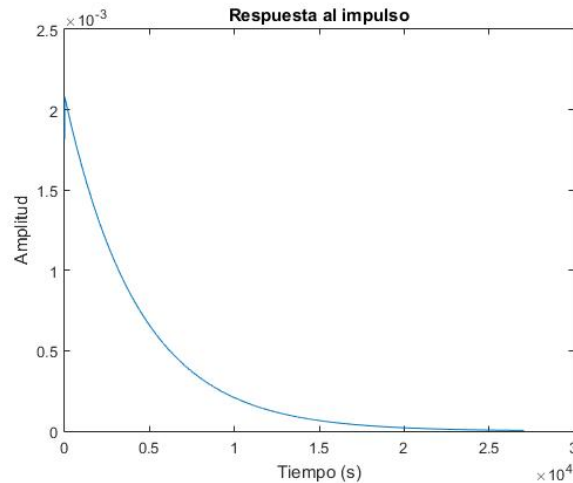


Figura 95. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en orellanas en la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

b. *Lentinula edodes* (shiitakes)

Para la etapa de incubación, se grafican los datos de salida, es decir la HR obtenida durante la acción de control del ventilador y del extractor, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 96.

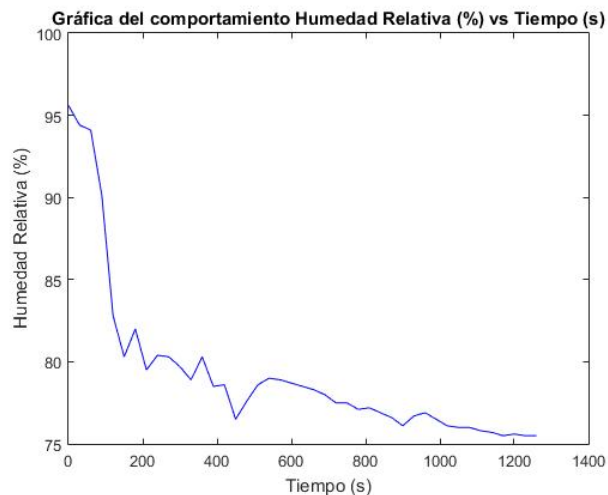


Figura 96. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 97, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la HR (%) vs. el Tiempo (s) de la figura 96.

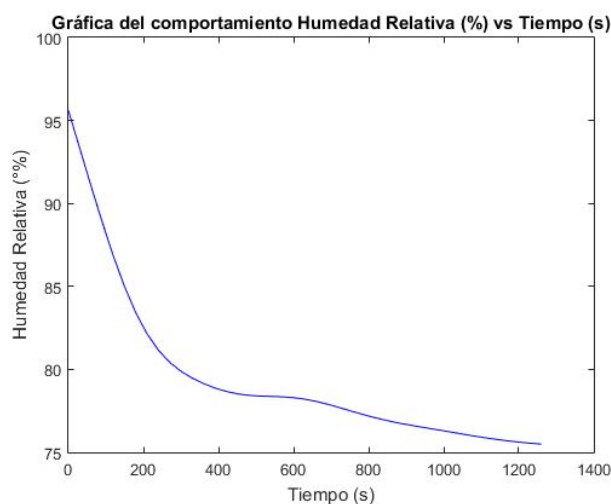


Figura 97. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo suavizada en shiitakes para la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 98, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el comportamiento de la HR vs. el tiempo de acción de la gráfica 97 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

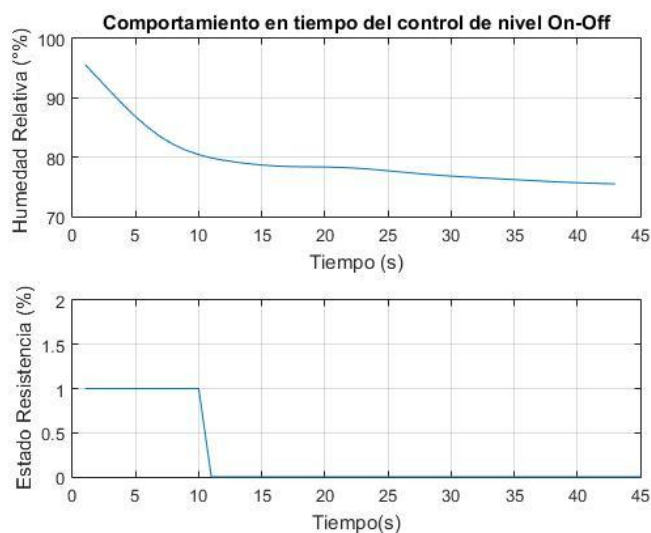


Figura 98. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de calefacción, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la HR del sistema, la cual se indicada a continuación.

$$\frac{4.225e-05}{s^2 + 0.04839 s + 1.666e-05}$$

Ecuación 19. Función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en incubación

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta dos polos y cero ceros. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 99) .

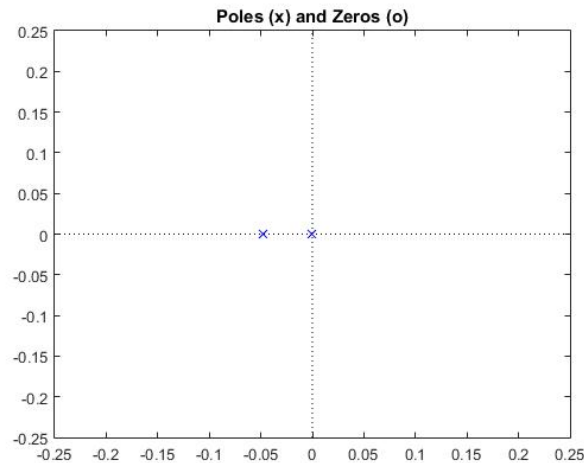


Figura 99. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 100).

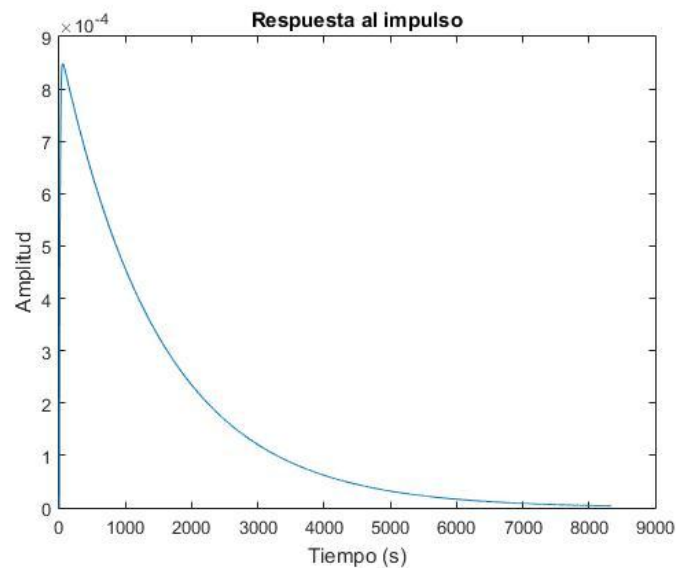


Figura 100. Respuesta al impulso del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

Para la etapa de fructificación, se grafican los datos de salida, es decir la HR obtenida durante la acción de control del ventilador y del extractor, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor DHT22, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 101.

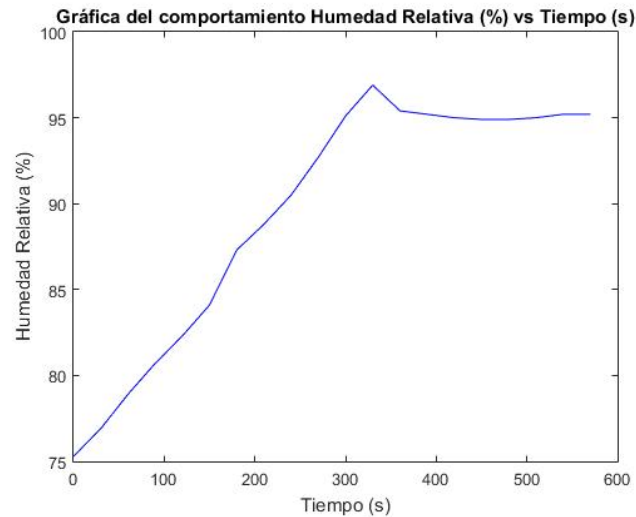


Figura 101. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 102 se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la HR (%) vs. el Tiempo (s) de la figura 101.

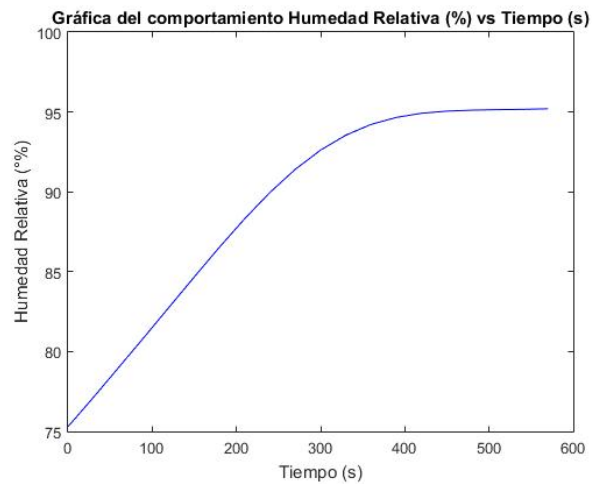


Figura 102. Gráfica del comportamiento humedad relativa vs tiempo suavizada en shiitakes para la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 103, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el el comportamiento de la HR vs. el tiempo de acción de la gráfica 102 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

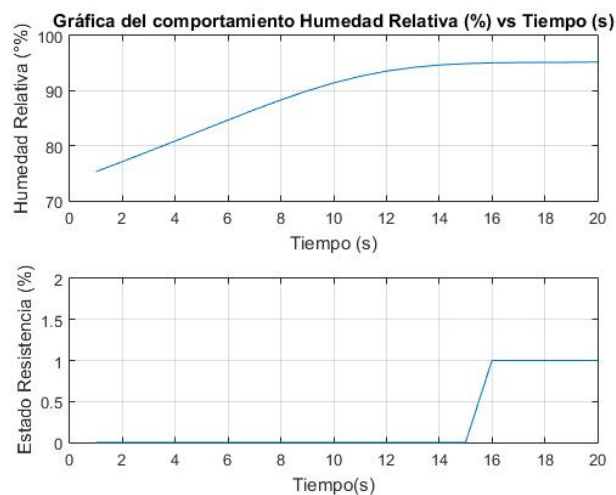


Figura 103. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de ventilación, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la HR del sistema, la cual se indicada a continuación.

$$5.2 s + 0.0006379$$

$$s^2 + 0.1729 s + 0.001722$$

Ecuación 20. Función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en fructificación.

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta presenta dos polos y un cero. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 104) .

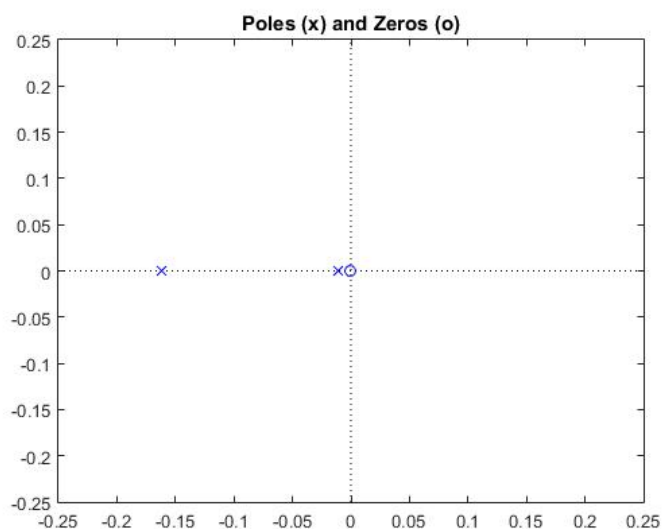


Figura 104. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 105).

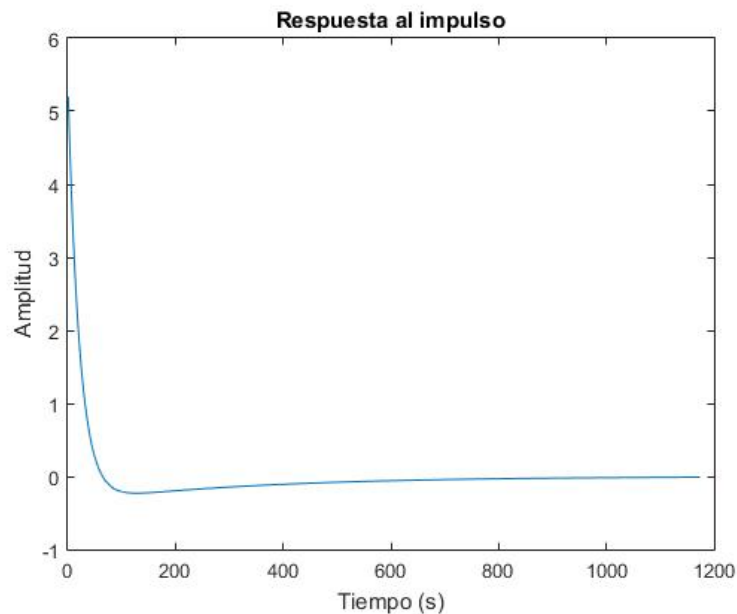


Figura 107. Respuesta al impulso del comportamiento humedad relativa vs tiempo en shiitakes en la fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.4.4 Sistema de riego

a. *Pleurotus ostreatus*

Para la etapa de incubación como fructificación, se grafican los datos de salida, es decir la humedad del sustrato obtenida durante la acción de control del sistema de riego activado por el humidificador, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor YL69, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 106.

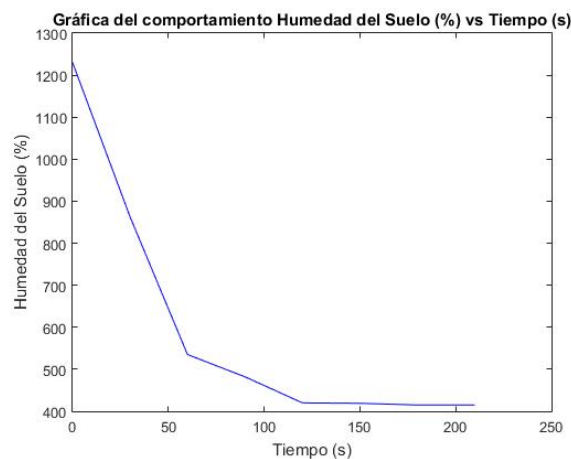


Figura 106. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en orellanas en incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura107, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la humedad del suelo (%) vs. el Tiempo (s) de la figura 106.

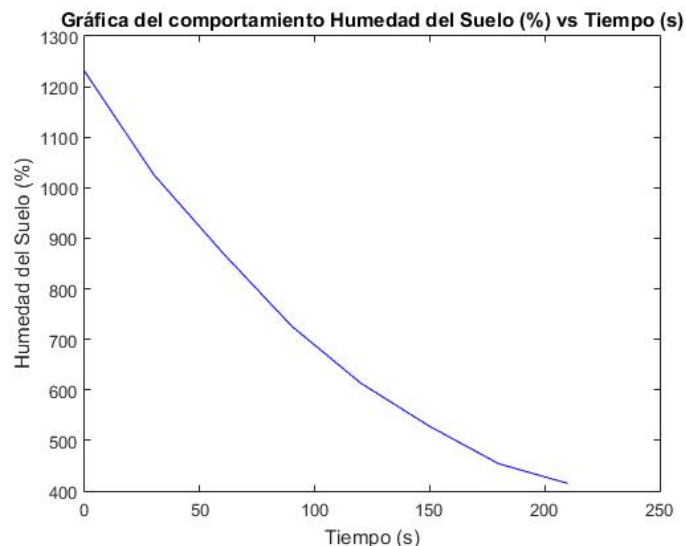


Figura 107. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo suavizada en orellanas en incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 108, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el el comportamiento de la humedad del suelo vs. el tiempo de acción de la gráfica 107 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

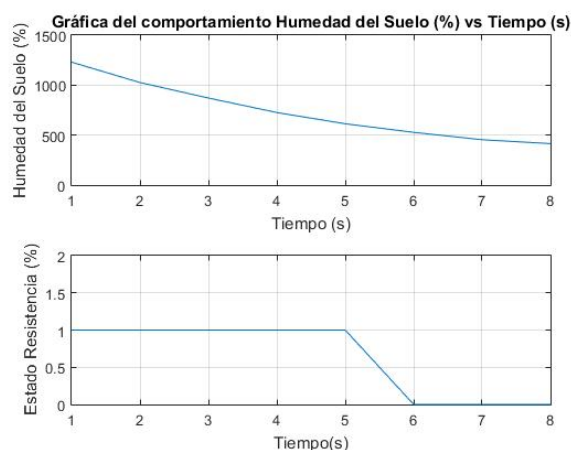


Figura 108. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en orellanas para la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de ventilación, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la humedad del suelo del sistema, la cual se indicada a continuación.

$$\frac{0.01261}{s^2 + 0.02818 s + 0.0001145}$$

Ecuación 18. Función de transferencia del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en orellanas en incubación

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta dos polos y cero ceros. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 109) .

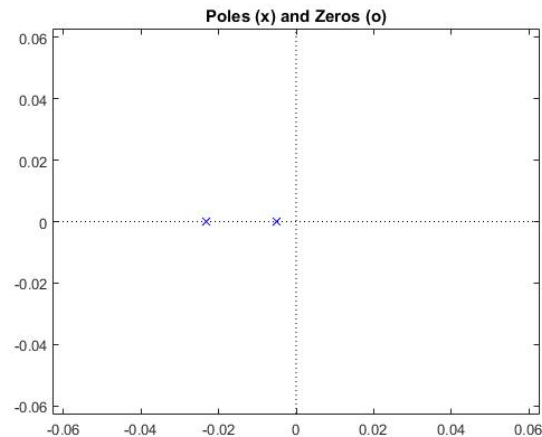


Figura 109. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en orellanas en la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 110).

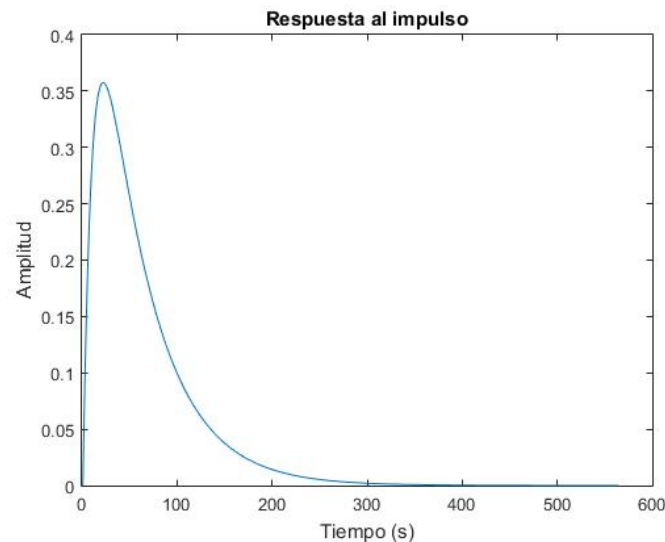


Figura 110. Respuesta al impulso del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en orellanas en la incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

b. *Lentinula edodes* (shiitakes)

Para la etapa de incubación como fructificación, se grafican los datos de salida, es decir la humedad del suelo obtenida durante la acción de control del sistema de riego accionado por el humidificador, con respecto a los valores de entrada, o sea el tiempo en el que duró dicha acción. Usando el sensor YL69, se obtuvo el comportamiento que presentan estos datos en la Figura 111

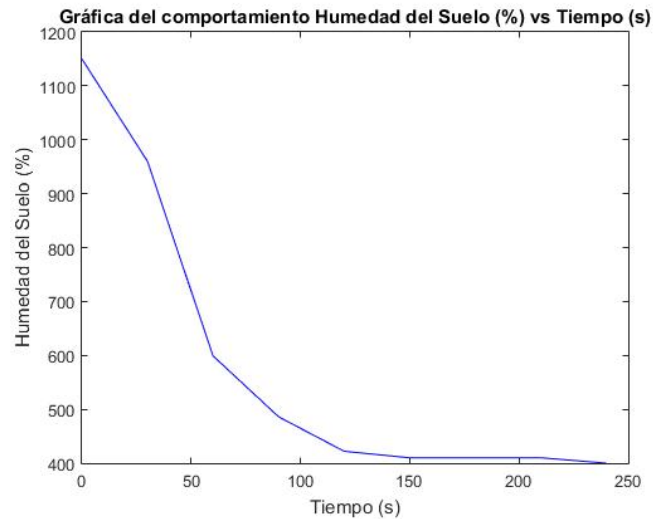


Figura 111. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en shiitakes en incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 114, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de la humedad del suelo (%) vs. el Tiempo (s) de la figura 113.

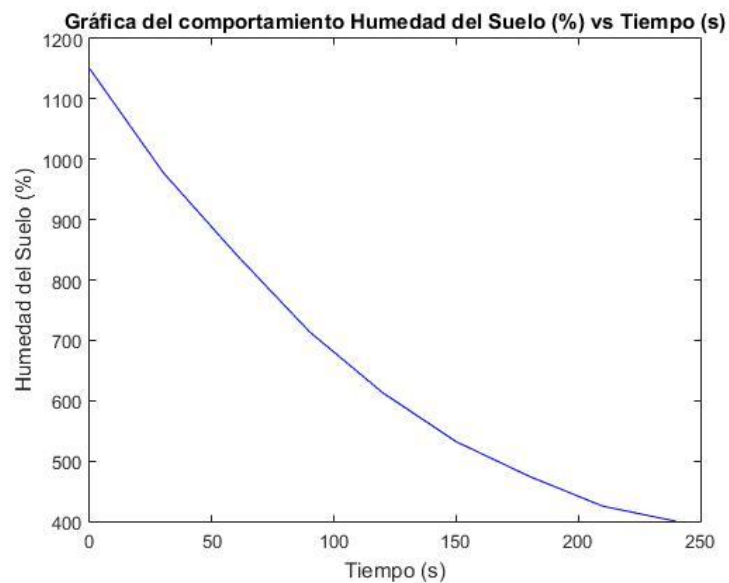


Figura 112. Gráfica del comportamiento humedad del suelo vs tiempo suavizada en shiitakes en incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 113, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el comportamiento de la humedad del suelo vs. el tiempo de acción de la gráfica 112 (curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

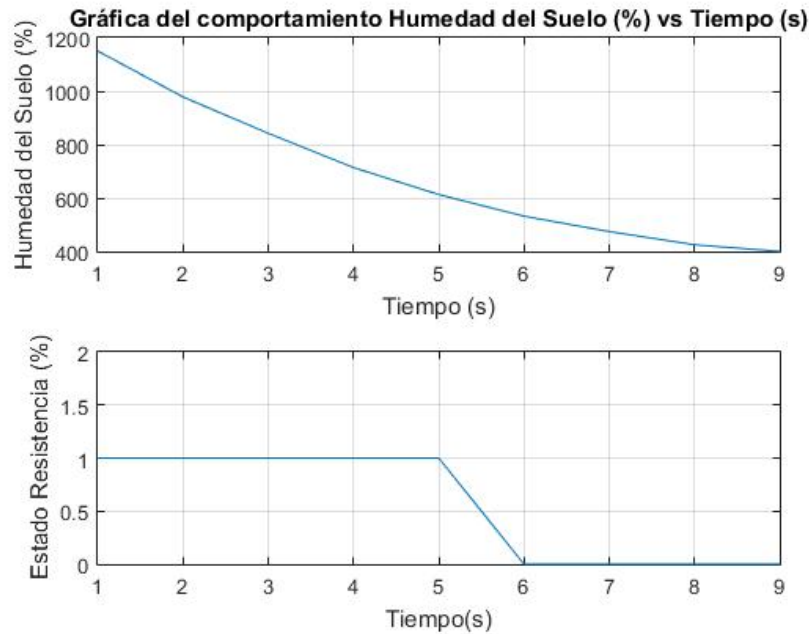


Figura 113. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en shiitakes para la incubación (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de ventilación, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la humedad del suelo del sistema, la cual se indicará a continuación.

$$0.02105$$

$$s^2 + 0.09599s + 0.0005271$$

Ecuación 19. Función de transferencia del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en shiitakes en incubación.

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta polos y ceros. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 114).

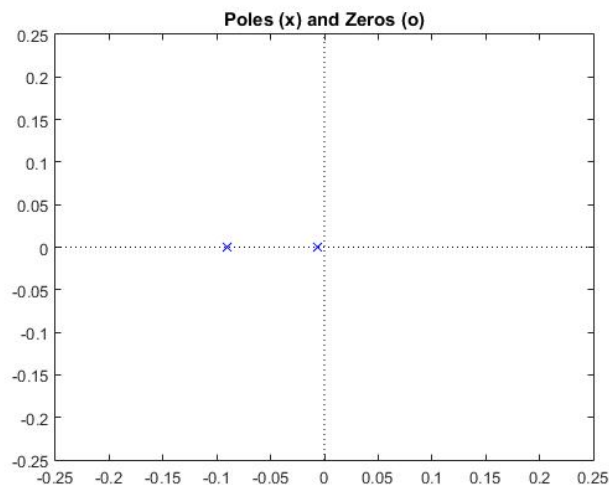


Figura 114. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en shiitakes en la incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 117).

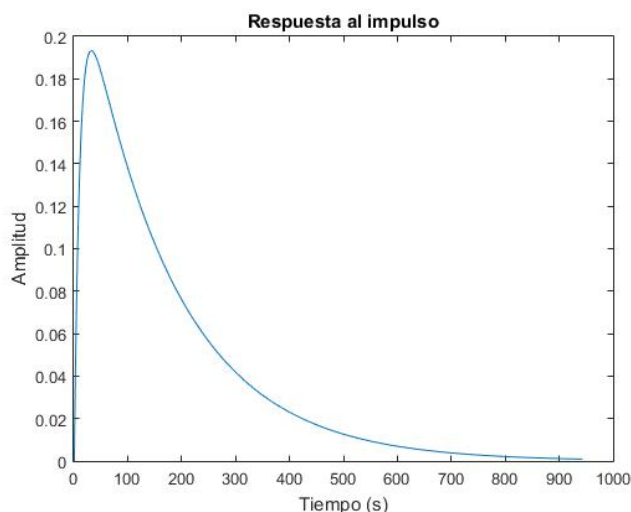


Figura 115. Respuesta al impulso del comportamiento humedad del suelo vs tiempo en shiitakes en la incubación. (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.4.5 Sistema lumínico

En etapa de incubación, no debe existir un control de luminosidad ya que los hongos *Lentinula spp.* y *Pleurotus spp.* crecen en penumbra.

En etapa de fructificación, se obtienen los siguientes resultados de los valores de salida, en esta caso, longitudes de onda (nm) con respecto al tiempo de la acción de control (Figura 116).

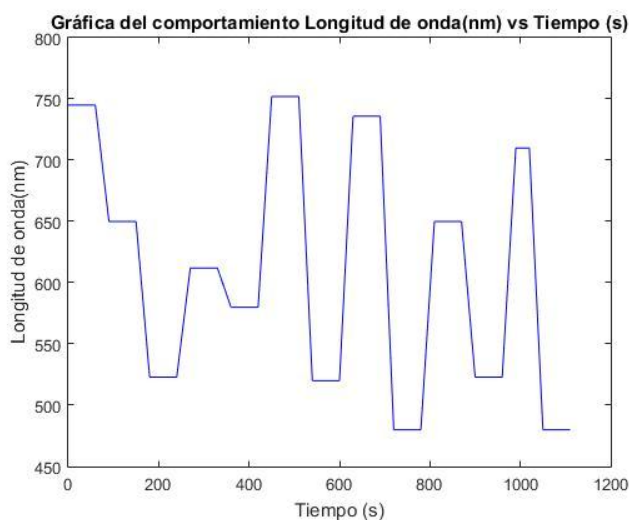


Figura 116. Gráfica del comportamiento longitud de onda vs tiempo en fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 117, se presenta la gráfica suavizada del comportamiento de longitud de onda (nm) vs. el Tiempo (s) de la figura 116.

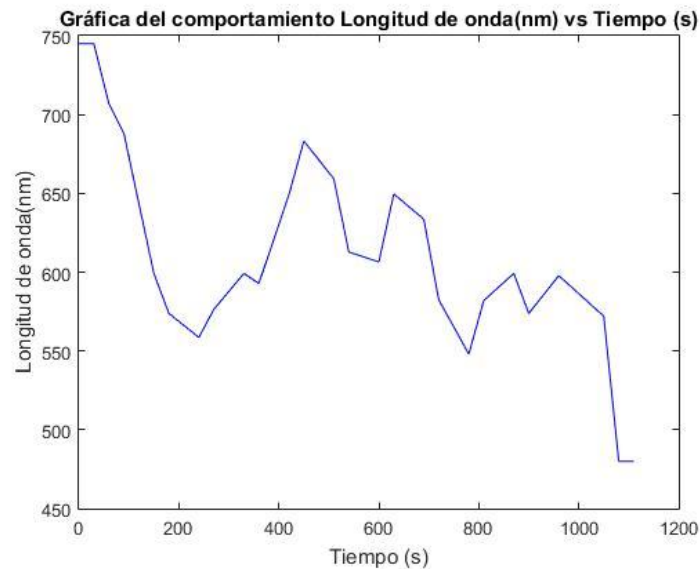


Figura 117. Gráfica del comportamiento longitud de onda vs tiempo suavizada en fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

En la figura 118, se puede visualizar mejor la representación del control ON/OFF si se grafica el el comportamiento de la longitud de onda vs. el tiempo de acción de la gráfica 117(curva superior) con respecto a la acción de control ON/OFF (curva inferior).

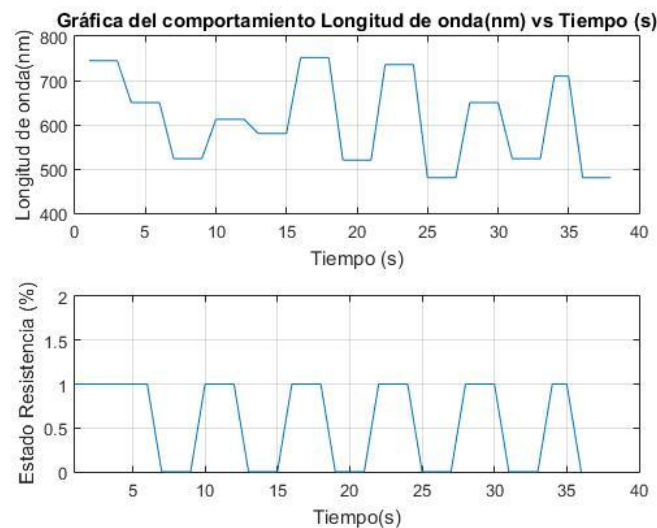


Figura 118. Comportamiento en tiempo del control de nivel On-Off en fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

En función del comportamiento del sistema de ventilación, se llega a una función de transferencia en tiempo continuo de segundo orden para la iluminación del sistema, la cual se indicada a continuación.

$$\frac{1890 \text{ s} - 4.413}{s^2 + 3.05 \text{ s} + 2.534}$$

Ecuación 20. Función de transferencia del comportamiento longitud de onda vs tiempo en fructificación

A partir de la función de transferencia, se concluye que el sistema presenta dos polos y un cero. Enseguida, se presenta la gráfica de estos en el plano z (Figura 119) .

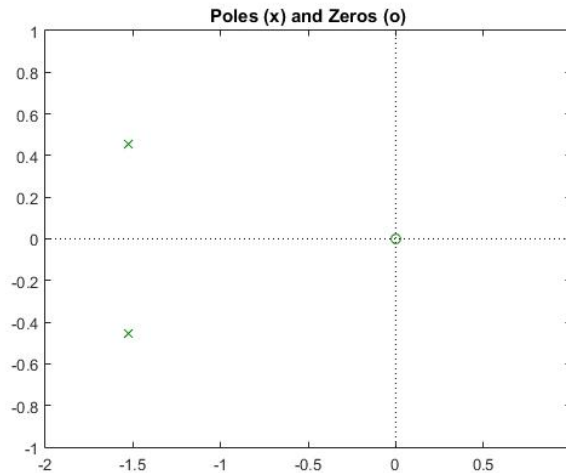


Figura 119. Polos y ceros de la función de transferencia del comportamiento longitud de onda vs tiempo en la fructificación (Anaya & Coronado, 2019).

Finalmente, se grafica la respuesta al impulso a partir de la función de transferencia (Figura 120).

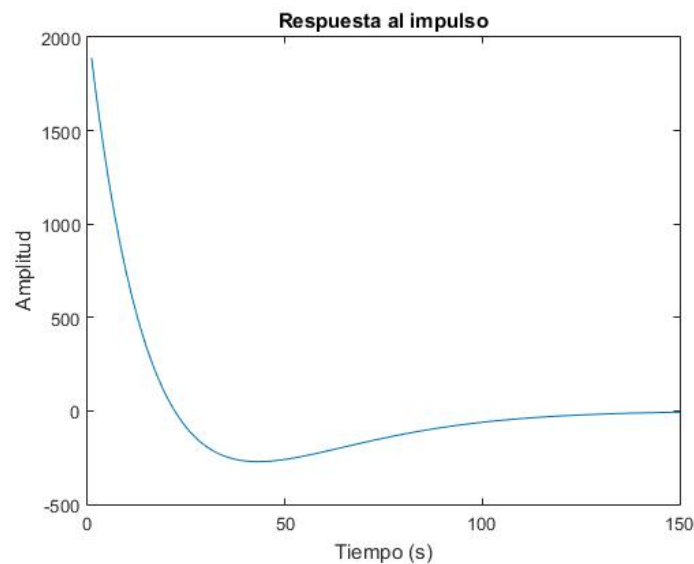


Figura 120. Respuesta al impulso del comportamiento longitud de onda vs tiempo en la fructificación. (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.5 Sistema de alerta

En la figura 121 pueden visualizarse como llegan los mensajes al celular del usuario al que se encuentra vinculado el Módulo ESP32 WiFi Bluetooth cuando se encuentra bajo una situación de riesgo el sistema.

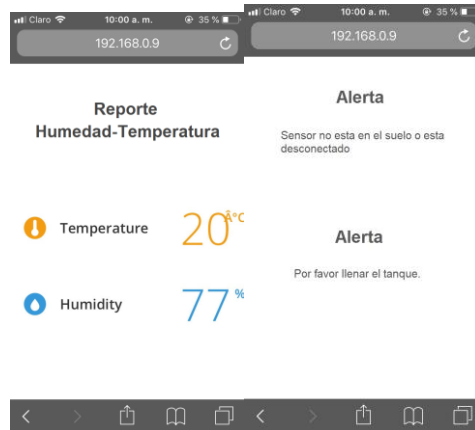
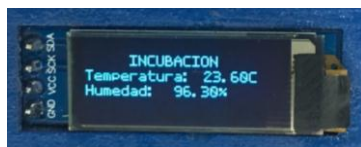


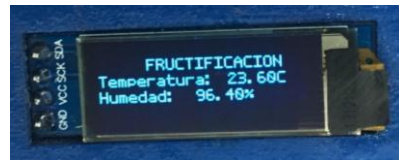
Figura 121. Visualización de mensajes de alerta enviados por el módulo ESP32 WiFi Bluetooth (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.6 Sistema de visualización

En la figura 122 se puede observar algunos de los datos arrojados por el OLED 0.91" 128x32. Otros datos arrojados son los datos obtenidos por el sensor YL-69.



122.a. Visualización de datos arrojados por el sensor de temperatura y humedad en etapa de incubación.



122.b. Visualización de datos arrojados por el sensor de temperatura y humedad en etapa de fructificación.

9.2.7 Sistema de monitoreo y control

Finalmente el sistema de monitoreo y control se puede apreciar en el prototipo de la figura 123.

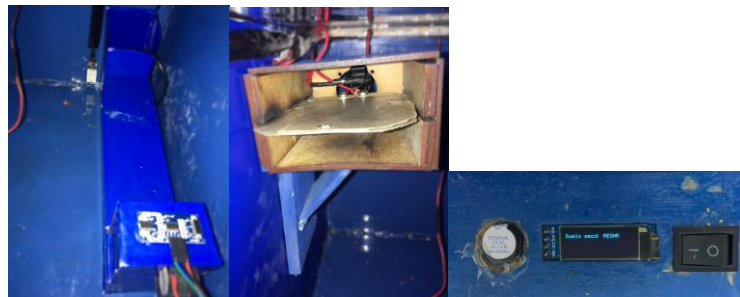


Figura 123. Sistemas de monitoreo y control hongos comestibles (Anaya & Coronado, 2019).



Figura 124. Prototipo final de huerto casero para hongos comestibles (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.8 Software

9.2.8.1 Software en Arduino

En este aparte se aprecia un diagrama de flujo que expone la metodología utilizada en la programación realizada en Arduino del sistema de monitoreo y control de huerto casero para hongos comestibles (Figura 125).

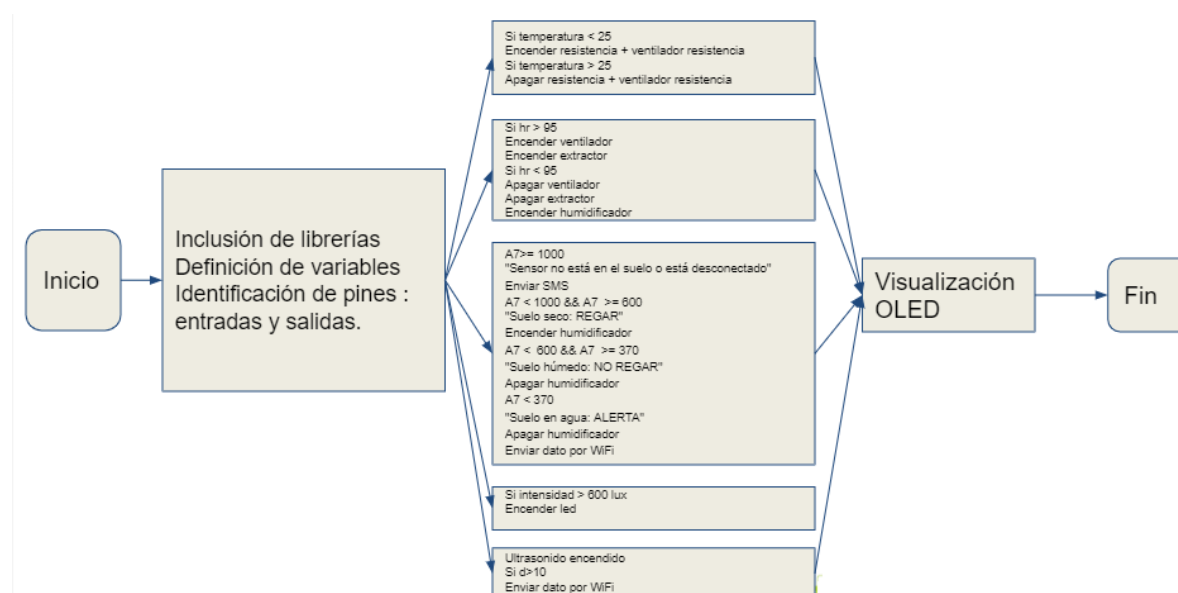


Figura 125. Diagrama de flujo código en Arduino (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.8.2 Software en MatLab

En este aparte se aprecia un diagrama de flujo que expone la metodología utilizada en el análisis del sistema de control de huerto casero para hongos comestibles realizado en MatLab (Figura 126).

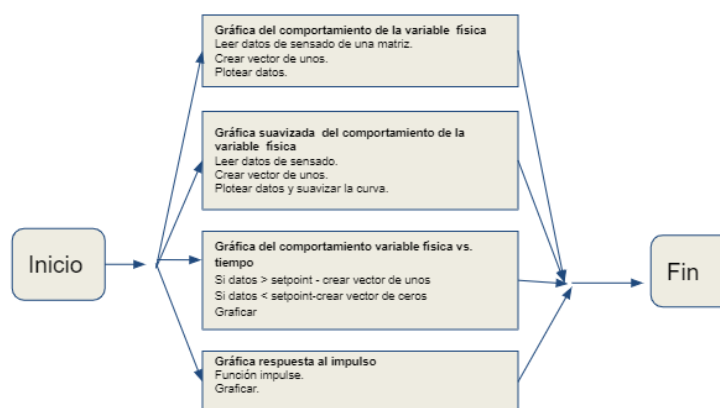


Figura 126. Diagrama de flujo código en MatLab (Anaya & Coronado, 2019).

9.2.9 Diseño de la cámara de incubación y fructificación

En la tabla 27 se visualizan las medidas obtenidas para el diseño del prototipo artesanal basándonos en las medidas del sustrato de cada especie.

Medidas	Prototipo preliminar	Prototipo Final
Ancho	40 cm	32 cm
Largo	50 cm	41 cm
Alto	50 cm	31 cm

Tabla 27. Medidas del prototipo preliminar y final del huerto casero para la ubicación de los hongos (Anaya & Coronado, 2019).

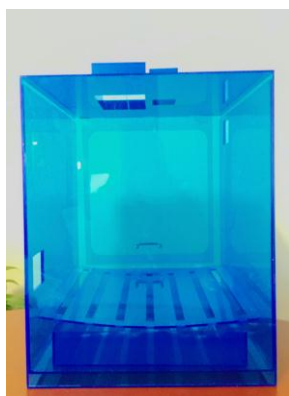
A partir de los planos generados en Autodesk Fusion 360, se construyó el prototipo preliminar en acrílico (Figura 127) y un prototipo final en acrílico y triplex (Figura 128). Obtenidas las medidas anteriormente tabuladas se construyeron el prototipo preliminar y final capaces de monitorear y controlar las condiciones físico-ambientales para el crecimiento de las dos especies (*Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*).



a. Vista frontal



b. Vista lateral izquierda



c. Vista posterior



d. Vista lateral derecha

Figura 127. Estructura en acrílico del prototipo preliminar (Anaya & Coronado, 2019).

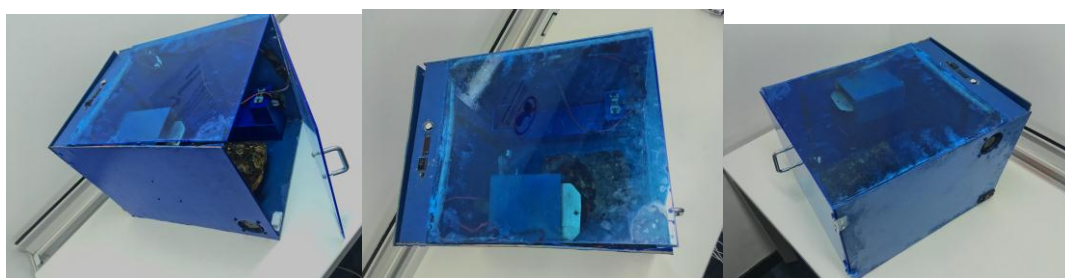


Figura 128. Estructura en acrílico y triplex del prototipo final (Anaya & Coronado, 2019).

9.3. Fase 2: Evaluación del huerto casero automatizado

9.3.1. Evaluación de la producción de hongos en el huerto automatizado y el prototipo artesanal.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la cosecha de los hongos de las especies *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes*, tanto en el prototipo artesanal como el huerto automatizado.

a. *Pleurotus ostreatus* (orellanas)

i. Aparición de primordios

La aparición de los primordios de *Pleurotus ostreatus* se dieron en el prototipo artesanal en aproximadamente 43 días desde la inoculación del hongo y la aparición de estos como se puede observar en la figura 129.a. En el caso del huerto automatizado la aparición de los primordios resultó en 36 días y se pueden observar en la figura 129.b. En la tabla 28 y figura 130 se pueden observar la organización de los datos obtenidos.



Figura 129. Aparición de primordios de *Pleurotus ostreatus*. (a) Prototipo artesanal. (b) Huerto automatizado.

	Prototipo Artesanal	Prototipo Automatizado	Literatura
Días aparición primordios <i>Pleurotus ostreatus</i>	43	36	29

Tabla 28. Número de días para aparición de primordios en cosecha de *Pleurotus ostreatus*.

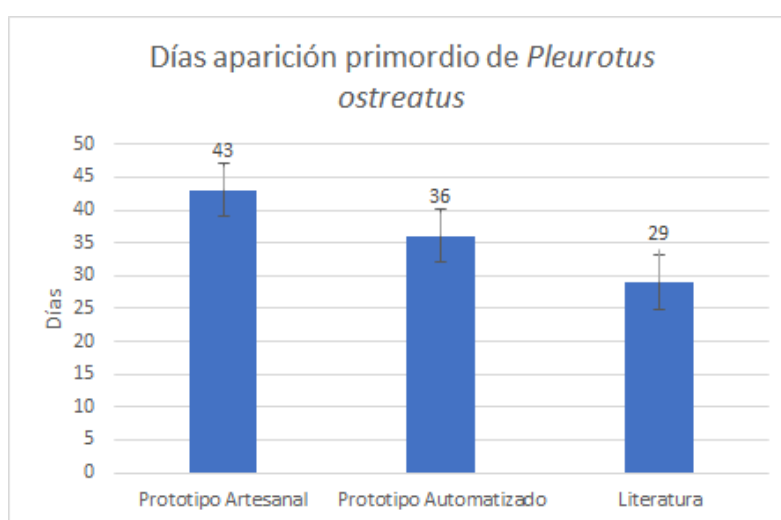


Figura 130. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios de la especie *Pleurotus ostreatus* (orellanas).

ii. Cosecha de carpóforos.

La cosecha del *Pleurotus ostreatus* en el prototipo artesanal se dio en aproximadamente 75 días desde la inoculación del hongo. En el caso del huerto automatizado la cosecha

resultó en 64 días. En la tabla 29 y figuras 131 y 132 se pueden observar la organización de los datos obtenidos.

	Prototipo Artesanal	Prototipo Automatizado	Literatura
Días de corte de carpóforos de <i>Pleurotus ostreatus</i>	75	64	64

Tabla 29. Número de días para la cosecha de *Pleurotus ostreatus*.

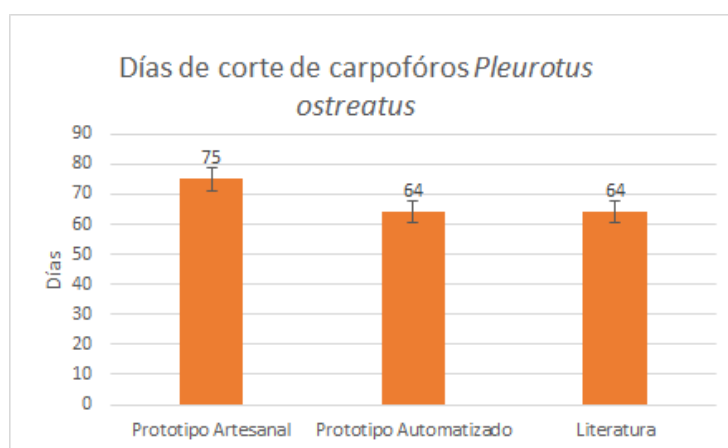


Figura 131. Datos obtenidos de la cosecha de los cuerpos fructíferos (carpóforos) de la especie *Pleurotus ostreatus* (orellanas)

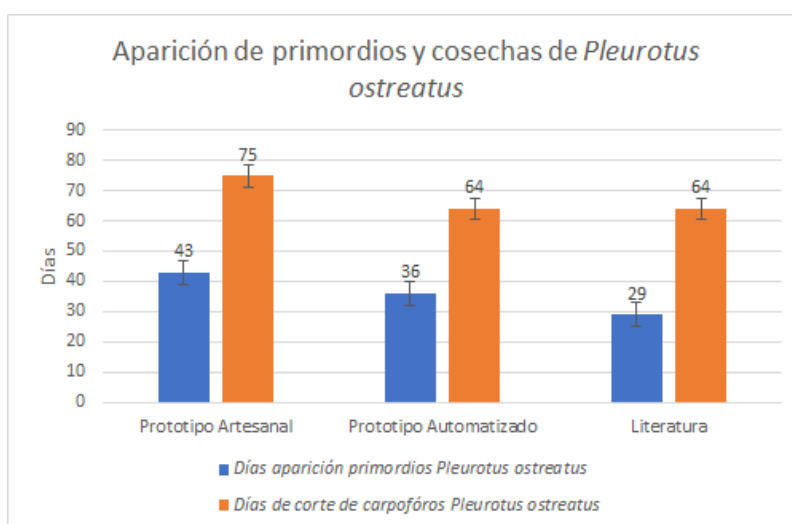


Figura 132. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios y la cosecha de la especie *Pleurotus ostreatus* (orellanas).

b. Eficiencia biológica

La eficiencia biológica se analizó teniendo en cuenta la relación entre el peso seco de los carpóforos y el peso total del sustrato. El peso seco de cada sustrato fue de 1 kg cada uno. Se obtienen los datos estadísticos observados en la figura 133.

	Peso cuerpos fructíferos (g)	Peso sustrato (g)	Eficiencia biológica (%)
Artesanal	150	1000	15
Automatizado	270	1000	38

Tabla 30. Eficiencia biológica de la primera cosecha de *Pleurotus ostreatus*.

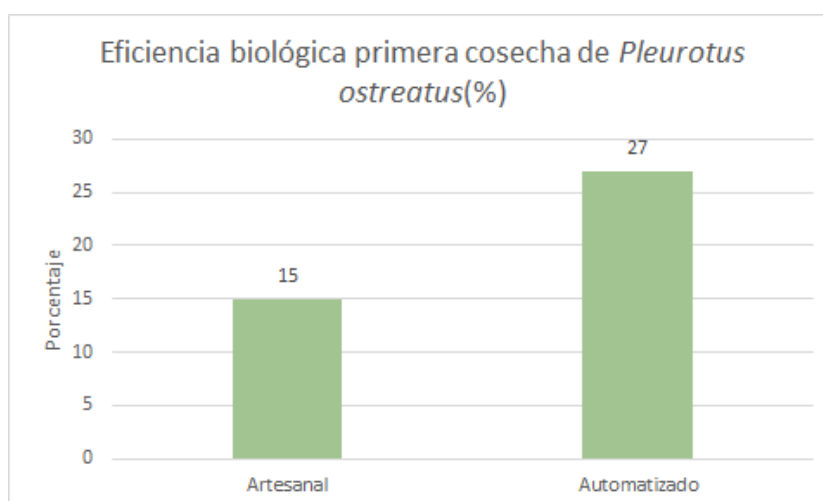


Figura 133. Eficiencia biológica de la primera cosecha de *Pleurotus ostreatus*.

c. Tamaño de los carpóforos



Figura 134. Medición de los cuerpos fructíferos de *Pleurotus ostreatus* (orellanas)
(Anaya & Coronado, 2019).

Para la medida del tamaño de los carpóforos (Figura 134) se obtuvo un promedio de todos los hongos que se cosecharon tanto para el prototipo artesanal y el huerto automatizado.

Muestras	Tamaño del carpóforo (cm)	
	Artesanal	Automatizado
1	5.2	6.3
2	4.8	5.8
3	4.3	6.5
4	4.7	6.7
5	5.1	5.9
Promedio	4.8	6.2

Tabla 31. Tamaño de los carpóforos de *Pleurotus ostreatus*.

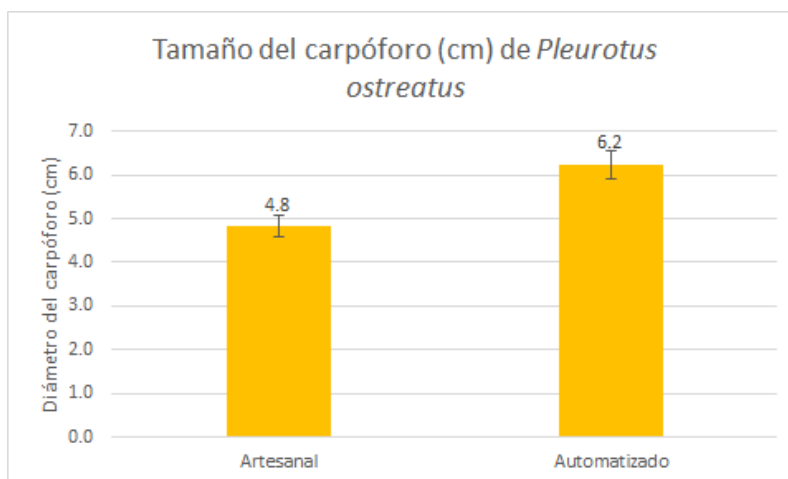


Figura 134. Tamaño de los carpóforos de *Pleurotus ostreatus* (orellanas).

b. *Lentinula edodes*

i. Aparición de primordios

La aparición de los primordios de *Lentinula edodes* se dieron en el prototipo artesanal en aproximadamente 72 días desde la inoculación del hongo y la aparición de estos como se puede observar en la figura 135 a. En el caso del huerto automatizado la aparición de los primordios resultó en 65 días y se pueden observar en la figura 135 b. En la tabla 32 y figura 136 se pueden observar la organización de los datos obtenidos.



Figura 135. Aparición de primordios de *Lentinula edodes*. (a) Prototipo artesanal. (b) Huerto automatizado.

	Prototipo Artesanal	Prototipo Automatizado	Literatura
Días aparición primordios <i>Lentinula edodes</i>	72	65	60

Tabla 32. Número de días para aparición de primordios en cosecha de *Lentinula edodes*.

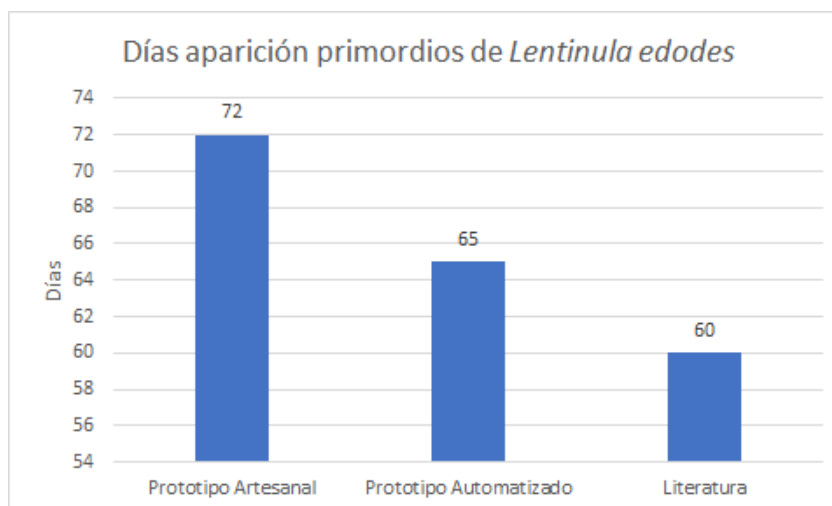


Figura 136. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios de la especie *Lentinula edodes* (shiitakes).

ii. Cosecha de carpóforos.



Figura 137. Cosecha de carpóforos de *Lentinula edodes*.

La cosecha del *Lentinula edodes* en el prototipo artesanal se dio en aproximadamente 84 días desde la inoculación del hongo. En el caso del huerto automatizado la cosecha resultó en 76 días. En la tabla 33 y figura 138 y 139 se pueden observar la organización de los datos obtenidos.

	Prototipo Artesanal	Prototipo Automatizado	Literatura
Días de corte de carpóforos de <i>Lentinula edodes</i>	84	76	64

Tabla 33. Número de días para la cosecha de *Lentinula edodes* (shiitakes).

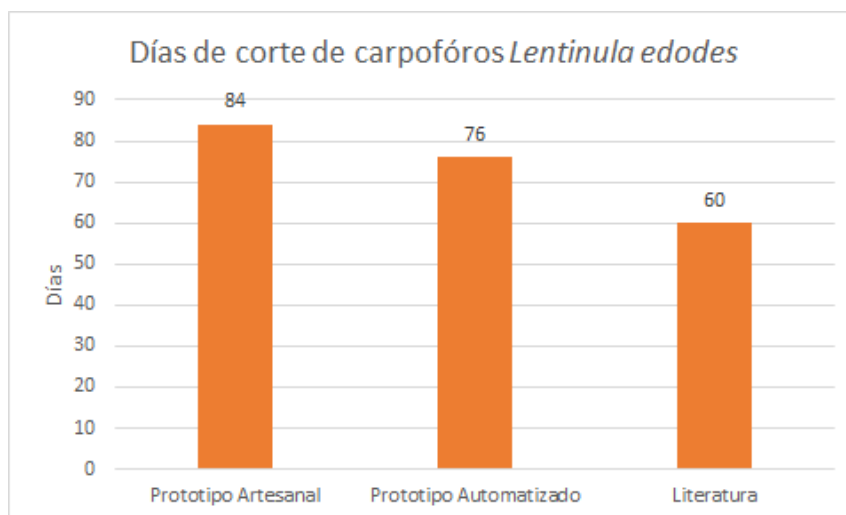


Figura 138. Datos obtenidos de la cosecha de los cuerpos fructíferos (carpóforos) de la especie *Lentinula edodes* (shiitakes).

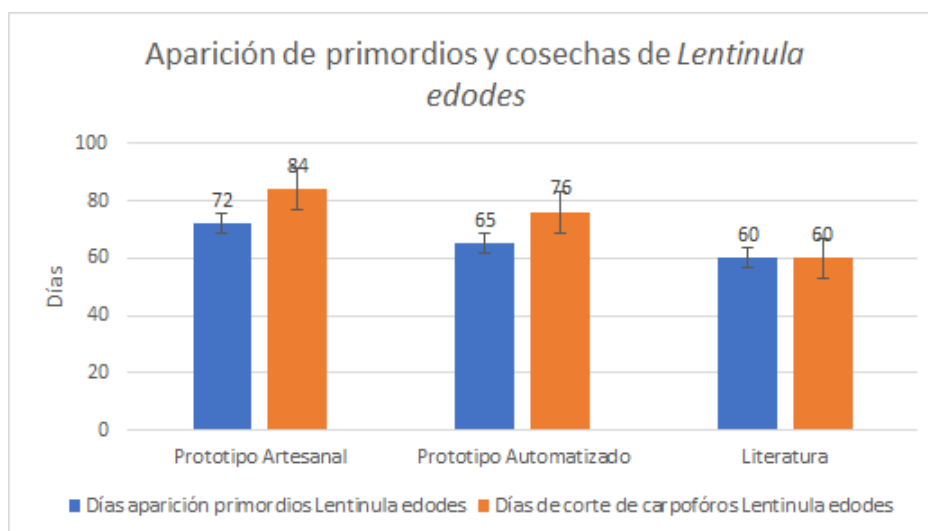


Figura 139. Datos obtenidos de la aparición de los primeros primordios y la cosecha de la especie *Lentinula edodes* (shiitakes).

d. Eficiencia biológica

La eficiencia biológica se analizó teniendo en cuenta la relación entre el peso seco de los carpóforos y el peso total del sustrato. El peso seco de cada sustrato fue de 1 kg cada uno.

	Peso cuerpos fructíferos (g)	Peso sustrato (g)	Eficiencia biológica (%)
Artesanal	180	1000	18

Automatizado	320	1000	32
--------------	-----	------	----

Tabla 34. Eficiencia biológica de la primera cosecha de *Lentinula edodes*.

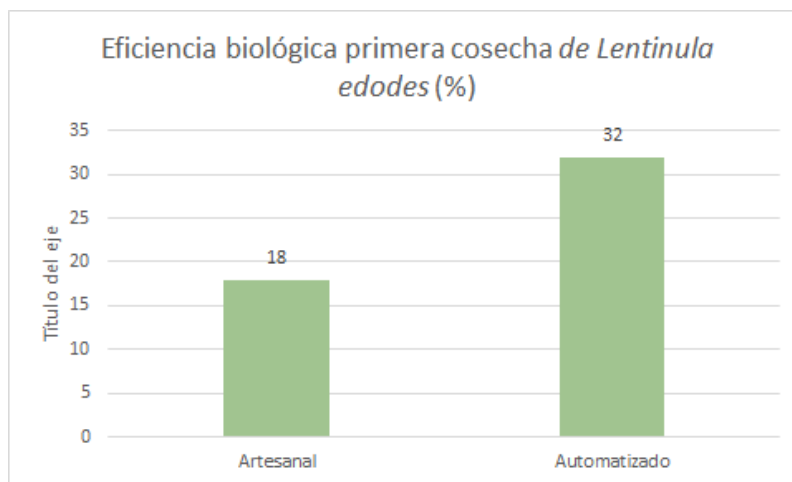


Figura 140. Eficiencia biológica de la primera cosecha de *Lentinula edodes* (shiitakes).

e. Tamaño de los carpóforos



Figura 141. Medición del cuerpo fructífero de *Lentinula edodes*.

Para la medida del tamaño de los carpóforos se obtuvo un promedio de todos los hongos que se obtuvieron por cosecha para el prototipo artesanal y el huerto automatizado.

Muestras	Tamaño del carpóforo (cm)	
	Artesanal	Automatizado
1	5.2	6.3
2	4.8	5.8

3	4.3	6.5
4	4.7	6.7
5	5.1	5.9
Promedio	4.8	6.2

Tabla 35. Tamaño de los carpóforos de *Lentinula edodes*.

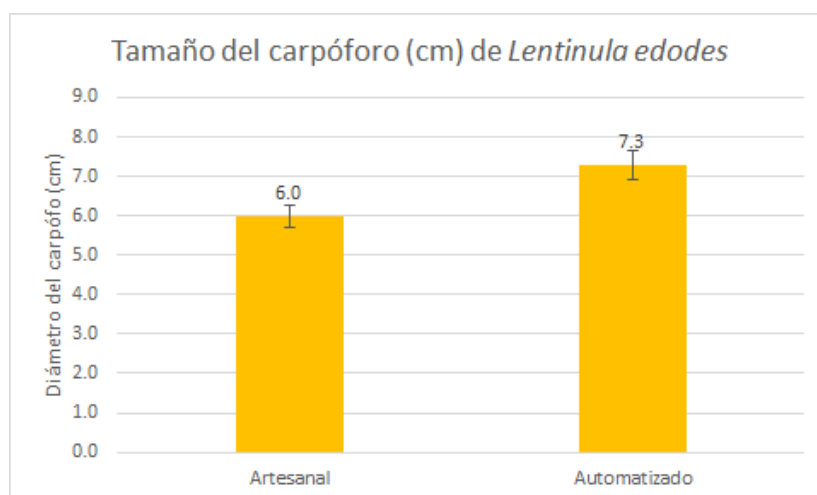


Figura 142. Tamaño de los carpóforos de *Lentinula edodes* (shiitakes).

e. Crecimiento de las especies en el huerto automatizado

A continuación se pueden observar en la secuencia de la figura 143 y 144 el crecimiento de Shiitakes y orellanas en el huerto automatizado.



Figura 143. Crecimiento de *Lentinula edodes* (shiitakes) en el huerto automatizado.



Figura 144. Huerto automatizado con un cultivo de *Lentinula edodes* (shiitakes) a punto de ser cosechados.



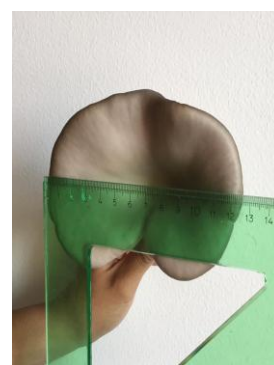
Aparición de los primordios.



Crecimiento de carpóforos primera semana



Crecimiento de carpóforos segunda semana



Cosecha de carpóforos

Figura 145. Crecimiento de *Pleurotus ostreatus* (orellanas) en el huerto automatizado.



Figura 146. Crecimiento de *Pleurotus ostreatus* (orellanas) en el huerto automatizado.

9.3.2. Cálculo del consumo energético del prototipo.

A continuación se observan los cálculos para determinar el consumo energético del huerto automatizado:

- Amperios hora obtenidos al día:

$$Ah = 24h \times 3A = 72Ah$$

- Potencia obtenida al mes:

$$Potencia\ al\ día = 110\ V \times 72\ Ah = 7920\ Wh\ al\ día$$

$$Potencia\ mensual = 7920\ Wh \times 4 = 31680\ Wh = 32\ KWh$$

- Consumo en pesos

$$Consumo\ en\ pesos = 32\ KWh \times \$531.75 = 17016\ pesos\ al\ mes$$

9.4 Fase 3: Desarrollo del manual de usuario

El manual de usuario para uso y mantenimiento de la cámara de incubación y fructificación de *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes* se puede encontrar como Anexo a este documento.

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

10.1 Discusión sobre el diseño e implementación del prototipo de huerto casero

- Debido a un proceso de retroalimentación del prototipo inicial o preliminar, se decide modificar los materiales, las dimensiones del prototipo preliminar, la ubicación del sistema de calefacción y de la torre de control en el prototipo final. Los materiales se reconsideraron debido al peso del acrílico, a su costo y a que este no puede someterse a grandes presiones y altas temperaturas, como por ejemplo, el triplex o el MDF. A estos últimos se les aplicó resina para impermeabilizarlos. Las dimensiones se modificaron para aprovechar mejor el espacio y así poder garantizar una estabilización en el sistema más rápida. La ubicación de la resistencia de calefacción junto al ventilador turbo se replanteó ya que era necesario aprovechar los vapores de calor y recircular el calor por la cámara de incubación y fructificación sin tener pérdidas de calor como ocurría en el prototipo preliminar. Finalmente, se diseñó un nuevo módulo de control que pudiese asegurarle al usuario mayor seguridad al usuario puesto que debe encontrarse alejado de la fuente de calor y agua que se encuentra dentro del sistema.

10.2. Discusión del sistema de control en etapa de incubación

- A partir de los resultados obtenidos en el sistema de control de lazo cerrado por ON/OFF, se observa, para las orellanas, que la curva del comportamiento empieza a oscilar a partir de $t = 190s$. Este ciclo en el controlador genera que las acciones ON/OFF del actuador se produzcan en valores distintos del error o de la salida. En efecto, el valor más alto se alcanza para $t = 195s$, siendo este de $24.9^{\circ}C (\pm 0.5^{\circ}C)$. Es posible notar que esta oscilación es estable alrededor de un punto de equilibrio, el cual se fija en el umbral $24.1^{\circ}C$ a $25^{\circ}C (\pm 0.5^{\circ}C)$ (Figura 68). Por su parte, la temperatura se estabiliza alrededor de $t = 490s$ para $temp = 24.4^{\circ}C (\pm 0.5^{\circ}C)$. El tiempo de muestreo total es de 500 segundos, es decir 8 minutos (Figura 69). En efecto, la inercia del sistema de control de la calefacción, y el hecho de que el actuador, en este caso la resistencia térmica, no provea una acción instantánea produce esta oscilación en el tiempo. Al observar la figura 72, se aprecia el comportamiento de la temperatura en función de un estado de unos (1) o de ceros (0). En efecto, cuando la resistencia se enciende, es decir cuando la curva crece, se observa un 1 y cuando se apaga, o sea los valores decrecen, un 0. De esta forma, es posible observar la respuesta del control de nivel tipo ON/OFF. Al igual que las orellanas, la temperatura de la cámara de incubación del shiitake presenta un comportamiento similar: se produce en el umbral de $24^{\circ}C$ a $24.9^{\circ}C (\pm 0.5^{\circ}C)$. La temperatura se estabiliza en $24.4^{\circ}C (\pm 0.5^{\circ}C)$ (Figura 78) y el tiempo de establecimiento se da aproximadamente a los 513 segundos o 10 minutos (Figura 79). Ambas temperatura se acercan al nivel de referencia de $24^{\circ}C$ por lo que se considera que el sistema de control es muy bueno. Se puede inferir que la sobreactuación que se produce de la resistencia térmica conlleva a que los sistemas, tanto de orellanas como de shiitakes, sean lentos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la energía utilizada en esta etapa es más alta ya que se deben aumentar por lo menos $6^{\circ}C$ teniendo en cuenta que la temperatura ambiente roza los $17^{\circ}C$.

- El comportamiento de la planta reflejado en la función de transferencia, es decir entre el comportamiento de la relación de la señal de salida y la de entrada, nos otorga información acerca sobre la estabilidad del sistema. Un sistema se considera estable si su respuesta al impulso tiende a cero cuando el tiempo tiende a infinito, además que todos los polos se encuentren en lado izquierdo del plano s. De esta forma, a partir de los resultados obtenidos, se logra establecer que el sistema de calefacción es estable (Figura 66 a Figura 122).
- Para el sistema de humedad relativa (HR), es decir humedad en el ambiente, se enciende el sistema de riego con el fin de crear humedad en el aire y de esta forma, se controla la humedad relativa de un valor muy alto al valor de referencia. Esto debido a que esta acción es la más probable de ocurrir dentro de la cámara de incubación y fructificación ya que a partir de las pruebas, fue posible observar que el sistema de riego moja las paredes del huerto y el sustrato en su totalidad, provocando más humedad relativa. Para las orellanas, el establecimiento de HR se logra en $t = 870$ s (14.5 min) para $HR = 76\%$ ($\pm 2-5\%$). Para el shiitake, el tiempo de establecimiento se alcanza cuando $t = 1260$ s (21 min) para $HR = 75.5\%$ ($\pm 2-5\%$). El tiempo de establecimiento largo puede deberse, por un lado, al tamaño de la cámara de incubación y por otro lado a la baja potencia del ventilador y del extractor. No obstante, ambas humedades relativas no se estabilizan en el valor de referencia, sugiriendo inestabilidad en el sistema. Aún así, el valor de ambas HR se encuentra dentro del intervalo 60% -80% que es el óptimo durante la etapa de incubación.

10.3 Discusión del sistema de control en etapa de fructificación

- A partir de los resultados obtenidos en el sistema de control de lazo cerrado por ON/OFF, se observa, para las orellanas, que la curva del comportamiento empieza a oscilar a partir de $t = 45$ s. Este ciclo en el controlador genera que las acciones ON/OFF del actuador se produzcan en valores distintos del error o de la salida. En efecto, el valor más alto se alcanza para $t=50$ segundos, siendo este de 18.8°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). Es posible notar que esta oscilación es estable alrededor de un punto de equilibrio, el cual se fija en el umbral 18°C a 18.7°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) (Figura 73). Por su parte, la temperatura se estabiliza alrededor de $t = 205$ s para $\text{temp} = 18.2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). El tiempo de muestreo total es de 236 segundos, es decir 4 minutos (Figura 74). En efecto, la inercia del sistema de control de la calefacción, y el hecho de que el actuador, en este caso la resistencia térmica, no provea una acción instantánea produce esta oscilación en el tiempo. Al observar la figura 75, se aprecia el comportamiento de la temperatura en función de un estado de unos (1) o de ceros (0). En efecto, cuando la resistencia se enciende, es decir cuando la curva crece, se observa un 1 y cuando se apaga, o sea los valores decrecen, un 0. De esta forma, es posible observar la respuesta del control de nivel tipo ON/OFF. Al igual que las orellanas, la temperatura de la cámara de incubación del shiitake presenta un comportamiento similar. La oscilación se produce en el umbral de 17.8°C a 18.4°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$). La temperatura se estabiliza en 18.1°C ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) (Figura 83) y el tiempo de establecimiento se da aproximadamente a los 322 segundos o 5 minutos (Figura 84). A comparación de la etapa de incubación, la acción de control se estabiliza más rápido en esta etapa, teniendo en cuenta que la temperatura debe disminuir aproximadamente 5°C con respecto a la temperatura en incubación. Es importante mencionar que el sistema de calefacción cuenta con un ventilador cuya función es

de aumentar la velocidad de disipación del calor dentro de la cámara. Ambas temperaturas de establecimiento coinciden con el valor de referencia de 18 °C, por lo que se considera que el sistema de control es exitoso.

- El tiempo de establecimiento en el sistema de humedad relativa (HR), para las orellanas, se logra en $t = 390$ s (6.5 min) para $HR = 95.3\%$ ($\pm 2-5\%$). Para el shiitake, el tiempo de establecimiento se alcanza cuando $t = 570$ s (9.5 min) para $HR = 95.2\%$ ($\pm 2-5\%$). Estos valores coinciden con el valor de referencia que se le otorgó al sistema de 95%. El sistema de humedad relativa satisface la parametrización acordada para esta etapa generando un control óptimo de esta variable física.
- Durante la etapa de incubación y fructificación, para el sistema de humedad del suelo, para ambos hongos, se alcanza un estado de suelo húmedo al cabo del mismo tiempo: 4 minutos ($\cong 240$ segundos). Para el prototipo artesanal, se utilizó un nebulizador ya que a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva, se determinó que este método podría ser de gran utilidad ya que el agua al ser pulverizada crea un halo capaz de humedecer tanto el suelo como el ambiente. Igualmente, se observa que las paredes de hule negro quedan parcialmente mojadas lo que ayuda a estimular el aumento de HR. Sin embargo, a partir de la observación del prototipo, se deduce que debido a la ubicación del nebulizador justo arriba del sustrato, la parte superior de este no alcanza a ser humedecida por lo que se opta como solución, utilizar en el prototipo de acrílico, dos mangueras con microperforaciones en aristas opuestas de la cámara de incubación y fructificación de los hongos comestibles. Esto con el fin de asegurar un riego completo al sustrato y por ende, la humidificación parcial o total de este mismo. El resultado similar de la humedad del suelo en ambos prototipos puede deberse a que el sensor YL-69 se coloca en el sustrato a una misma distancia en ambos y no existe ninguna perturbación exterior que influya en el sustrato.

10.4. Discusión sobre el crecimiento y desarrollo de *Pleurotus spp.* y *Lentinula spp.*

- Según los resultados analizados de la aparición de primordios se observó que en el prototipo artesanal se dieron los primordios de *Pleurotus ostreatus* en aproximadamente 43 días desde que se inoculó el hongo. En cambio en el huerto automatizado se obtuvieron en 36 días, esto debido a las condiciones del lugar, ya que en la zona de incubación siempre se intentó mantener en 25°C con una humedad relativa de 80-96%. Sin embargo, en el prototipo artesanal no se estaba asegurando la temperatura ni la humedad relativa deseada todo el tiempo. La cosecha se dio en el prototipo artesanal a los 75 días, en cambio en el huerto automatizado se dieron a los 64 días como se registra en literatura. Deduciendo así que las condiciones del huerto automatizado eran las óptimas para el correcto crecimiento y desarrollo de los hongos, puesto que el sistema le brindaba la respuesta necesaria en el momento adecuado para que se mantuvieran las condiciones. Para la especie *Lentinula edodes*, la aparición de los primordios se dieron a los 72 días desde la inoculación del hongo en el prototipo artesanal y en el huerto automatizado a los 65 días con un reporte en literatura de 64 días, esto es debido a las condiciones de cultivo dadas en el prototipo artesanal, ya que no se encontraba en las condiciones óptimas de temperatura y humedad relativa para inducir el cultivo a la aparición de los primordios. En cambio, en el huerto

automatizado se debió cambiar el sistema de calefacción para poder mantener la temperatura deseada de 25°C aproximadamente y así inducir la aparición de los primordios en el sustrato. Es por esto que tardó un poco más en comparación con lo reportado en literatura. Así pues, la cosecha de *Lentinula edodes* se dio a los 84 días para el prototipo artesanal y para el automatizado se dio a los 76 días, dadas las condiciones anteriormente expuestas, se sometió a un choque térmico para que la fructificación fuera mayor en la primera cosecha. Esto consiste en bajar la temperatura y mantener las condiciones de humedad relativa en un rango de 90-100%.

- La **eficiencia biológica** hace referencia a la relación entre el peso seco de los cuerpos fructíferos de los hongos y el peso total del sustrato seco, que para cada muestra fue de 1000 g multiplicado por 100. Esto nos da un estimado en porcentaje de la eficiencia del cultivo, sobre cuánta producción puede dar 1 kg de los sustratos ubicados en el huerto automatizado y en el prototipo artesanal. La importancia del rendimiento del cultivo es fundamental para analizar la viabilidad del proyecto y conocer el prototipo que más se acondicione a las necesidades del cultivo. Basado en los resultados de *Pleurotus ostreatus*, se obtuvieron mejores resultados de eficiencia en el huerto automatizado con un 38% y en el artesanal se obtuvo un 15%, esto fue debido a que en el huerto automatizado se estaba asegurando una humedad relativa de un 98% aproximadamente y en esta condición, la fructificación aumenta. A su vez, al tener ventilación y al ser un espacio más grande se estaba asegurando un intercambio gaseoso con el ambiente. El bajo rendimiento en el prototipo artesanal fue debido a que no se garantizaba la humedad relativa y la aireación adecuada para una mayor fructificación en las primeras cosechas. Para la especie *Lentinula edodes* la eficiencia biológica de la primera cosecha fue mayor en el prototipo automatizado de un 32%, en cambio en el prototipo artesanal fue de un 18%. Esta diferencia radica en que en el huerto automatizado se presentaron las condiciones idóneas de humedad relativa alta (90-100%) para que la fructificación se diera en mayor proporción que en el prototipo artesanal y el descenso de la temperatura. La cantidad de carpóforos y el tamaño fue mucho mayor en el huerto automatizado, así pues, la eficiencia aumenta dado a que depende del peso de los cuerpos fructíferos.

10.5. Consumo energético del huerto automatizado.

En este apartado nos proponemos a analizar el consumo energético del huerto automatizado implementado, puesto que existen varios retos ambientales en torno al ámbito energético tales como el cambio climático, la seguridad del suministro y la disminución de la intensidad energética. Es por esto que se deben promover soluciones que ayuden a que los recursos se utilicen de manera eficiente y exista un ahorro. Cuando el huerto automatizado se conecta a la pared, este debe mantenerse las 24 horas encendido dado que los hongos necesitan permanecer en un control constante. Sin embargo, dada la información obtenida por los cálculos de potencia y energía que consume el dispositivo, notamos que en comparación con un horno microondas que necesita de una potencia de 1500 W y si suponemos que se usa 1 hora diario, es decir, 30 horas al mes se tendría un valor de 45KWh lo cual en precio de un hogar estrato 4 estaría alrededor de los 23.928 pesos. Así pues, si analizamos nuestro dispositivo que se encuentra encendido prácticamente todos los días del

mes, este exige 32KWh mensual, lo cual traducido a pesos, estaría en aproximadamente 17.016 pesos. Si bien es cierto que se pueden implementar otras estrategias para evitar un consumo energético elevado, podemos notar que se está brindando un buen servicio a un costo accesible (Peña, 2012).

11. CONCLUSIONES

- Se simularon las condiciones idóneas para el crecimiento de las especies de hongos escogidas bajo los requerimientos previamente establecidos.
- Se logró ubicar un sistema de ventilación capaz de direccionar el flujo de aire dentro del huerto automatizado.
- El sistema de control escogido permitió un tiempo de respuesta rápido para estabilizar el sistema de manera eficaz.
- Los sistemas establecidos en el prototipo permiten la autonomía del mismo.
- Se evidenció que la eficiencia biológica de la primera cosecha de *Pleurotus ostreatus* (orellanas) fue de un 38% en el huerto automatizado, mientras que en el prototipo artesanal fue de un 15% indicando así que el huerto automatizado cumple con las condiciones necesarias para que los hongos se desarrollen. Así pues, fue el mismo caso para *Lentinula edodes* (shiitake) que presentó una eficiencia biológica de un 32% y para el artesanal de un 18%.
- Se dedujo mientras un análisis energético que el consumo del mismo es económico al compararse con otros electrodomésticos, dado que el usuario sólo paga 17016 pesos mensuales adicionales teniendo en cuenta el costo de estos hongos en el mercado.
- Mediante la realización de este proyecto se concluye que, en la búsqueda de soluciones a la contaminación por plaguicidas y a la inmersión en alternativas agrícolas sostenibles que utilicen la producción limpia. A su vez, es indispensable buscar la autonomía de los cultivos utilizando sistemas de monitoreo y control capaces de medir las variables físicas de interés y actuar sobre ellas, proporcionándoles las condiciones necesarias para el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo. De esta manera, se logra tener más y mejor producción del alimento inocuo, pero más importante, una calidad en él que se puede establecer mediante la comparación de un estudio de los nutrientes entre productos de un cultivo contaminado y uno limpio.

12. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO

- Estudios posteriores podrían indicar el valor nutricional de los hongos provenientes de la cámara de fructificación, así como su sabor y olor.
- Implementación de un sistema de alimentación de respaldo, tal como una batería en dado caso que no se cuente con energía en el momento.
- Implementación de un sistema de control PID que pueda retroalimentar al sistema y así este no presente tantas oscilaciones en la respuesta de los actuadores.
- Implementación de un termofusible en el sistema de calefacción, de un flotador en vez de un sensor ultrasónico en el sistema de riego.
- Implementación de materiales resistentes y permeables.

BIBLIOGRAFÍA

Aktar, W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2009). Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdisciplinary toxicology*, 2(1), 1-12.

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2015). Acuerdo 605 de 2015 Concejo de Bogotá D.C. Obtenido de https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=62903&dt=S&fbclid=IwAR3eqC7dbl_gRdnCYKfVRozTlz-2daPdD2oW8Kr-Ti9GKY1j9FCTTKi9uOs

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2018). Banco Distrital de Programas y Proyectos. Ficha de Estadística Básica de Inversión Distrital EBI-D. Obtenido de http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/1119_218_jardin_botanico_jose_celestino_mutis.pdf

Arduino. (2015). Switch (case) Statement, used with sensor input. Retrieved from <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/SwitchCase>

Arduino. (s.f.). Arduino. Obtenido de <https://www.arduino.cc/>

Arduino. (s.f.). Getting Started with the Arduino GSM Shield. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoGSMShield>

Areny, R. (2004). Sensores y acondicionadores de señal. Marcombo.

Barchańska, H., & Płonka, J. (2018). Quality Control of Plant-Based Foods in Terms of Nutritional Values: Influence of Pesticides Residue and Endogenous Compounds. In *Food Control and Biosecurity* (pp. 407-449). Academic Press.

Barriga, L., & Leal, D. (2011). Agricultura urbana en Bogotá. Una evaluación externa-participativa.

Bashir, M. H., & Ali, M. A. (2014). Efficacy of different insecticides against mushroom sciarid fly (*Lycoriella auripila*) in Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Nutrition*, 13(1), 50-55.

Bawa, Dipti, and C. Y. Patil. "Fuzzy control based solar tracker using Arduino Uno." *International Journal of Engineering and Innovative Technology* 2.12 (2013): 179-187.

Boa, E. (2005). HONGOS SILVESTRES COMESTIBLES, LOS: PERSPECTIVA GLOBAL D (No. 17). Food & Agriculture Org..

Bogdan, M. (2016). How to use the DHT22 sensor for measuring temperature and humidity with the arduino board. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, 68(1), 22-25.

BricoGeek. Ventilador SparkFun 5cm 5V. Obtenido de: <https://tienda.bricogeek.com/descatalogado/662-ventilador-5cm-5v.html>

Brittain, C., & Potts, S. G. (2011). The potential impacts of insecticides on the life-history traits of bees and the consequences for pollination. *Basic and Applied Ecology*, 12(4), 321-331.

Castro, C., Diana, N., Chamorro, F., Eduardo, L., Viteri, M., & Andrés, C. (2016). Una red de sensores inalámbricos para la automatización y control del riego localizado. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 106-116.

Castro Domínguez, A. (2013). Sistema de control de temperatura a través de Arduino y la tecnología GPRS/GSM.

Chang, S. T., & Hayes, W. A. (Eds.). (2013). *The biology and cultivation of edible mushrooms*. Academic press.

Congreso de la República de Colombia. (2010). Ley 128 del 2010. Agricultura Urbana. Obtenido de <http://www.camara.gov.co/agricultura-urbana-0>

Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES). (2008). Documento CONPES. Política Nacional Fitosanitaria y de inocuidad para las cadenas de frutas y otros vegetales. Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/conpes/2008/Conpes_3514_2008.pdf

Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES). (2008). Documento Conpes Social. POLÍTICA NACIONAL DE SEGURIDAD ALIMENTARIA Y CIONAL DE SEGURIDAD ALIMENTARIA Y. Obtenido de https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Conpes/Conpes%20113%20de%202008.pdf?fbclid=IwAR1c9sl6LPO9wE9pPflFgh4_kLKWcrfx0hniW4QI7KQbGDm1RaxusUOWRIs

Cruz Gutiérrez, C. R. A., & Vargas Márquez, V. A. (2018). Diseño de un prototipo de incubación artificial con sistema de control difuso para la producción de aves de codorniz.

Cudris García, N. M. Caracterización de la microbiota contaminante del cultivo de lentinula edodes (shiitake) en diferentes residuos agroforestales (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

Díaz, S. M., Sánchez, F., Varona, M., Eljach, V., Muñoz, G., & Nathalia, M. (2017). Niveles de colinesterasa en cultivadores de papa expuestos ocupacionalmente a plaguicidas, Totoró, Cauca. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 49(1), 85-92.

Digital Citizen (2018). What is OLED?. Obtenido de <https://www.digitalcitizen.life/what-is-oled-what-does-it-mean>

Dorf, R., Bishop, R., Canto, D., Canto, R., & Dormido, S. (2005). *Sistemas de control moderno*. Pearson Prentice Hall.

Efinox. (s.f) Resistencia horno-estufa 3000w 230v. Retrieved from <https://www.efinox.com/resistencia-horno-estufa-3000w-230v>

Electrónicos Caldas. (2011). Silicon PIN Photodiode. TEFD4300F. Vishay Semiconductors. Retrieved from. https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/TEFD4300F_Vishay.pdf

Electrónicos Caldas. (2007). TSL257 HIGH-SENSITIVITY LIGHT-TO-VOLTAGE CONVERTER. TAOS. Retrieved from https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/TSL257_Taos-ams-AG.pdf

Enciso, J. M., Porter, D., & Peries, X. (2007). Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. University of Texas System, Austin, TX.

Espressif. ESP32. (s.f.) Obtenido de <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview>

Espresso Mushroom Company. . (s.f.). Grow your own Oyster mushrooms in two weeks! . Obtenido de <https://espressomushroom.co.uk/>

Fecegypto. (s.f). High Sensitivity Moisture Sensor. Retrieved from https://www.fecegypt.com/uploads/dataSheet/1480854383_water%20and%20soil.pdf

Food and Agriculture Organization (FAO). (2002). Manual de Buenas Prácticas Agrícolas, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO Eds. Roma.

FarGreen. (s.f.). Premium Sustainable Mushrooms. Obtenido de <http://www.far-green.com/>

FAO. (2014). A Vegetable Garden for All. Obtenido de Food And Agriculture Organization of the United Nations: <http://www.fao.org/docrep/019/i3556e/i3556e.pdf>

FAO. (2018). Agricultura Urbana. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: <http://www.fao.org/urban-agriculture/es/>

FAO. (2018). El Estado de la Seguridad Alimentaria y la Nutrición en el Mundo. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación.

GitLab. (2018). Using the YL-69 & YL-38 to detect the soil humidity. Retrieved from <https://gitlab.ozoneprojects.fr/ozone/greenhouse/commit/fceccd188505ac74287be11b6630176a887ecdc5>

Gómez Rodríguez, J. N. (2014). Agricultura urbana en América Latina y Colombia: perspectivas y elementos agronómicos diferenciadores. Repositorio UNAD. Obtenido de UNAD.

GroCycle. (2018). GroCycle Urban Mushroom Farm. Low tech Mushroom Farming. Obtenido de <https://grocycle.com/>

Hernández Gaviño, R. (2010). Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab. México: Pearson.

Huertas Medina, T. C (2016). Dispositivo de monitoreo médico para visualizar en casa. PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21412/HuertasMedinaTatianaCarolina2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ICT International. (s.f). Which soil moisture sensor should I choose?. Enabling better global research outcomes in soil, plant & environmental monitoring. Retrieved from http://www.ictinternational.com/case-study-pdf/?product_id=1483

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2005). Subgerencia de protección y regulación agrícola. Restricciones, prohibiciones y suspensión de registros de plaguicidas de uso agrícola en Colombia. Disponible en: <http://www.ica.gov.co/getdoc/b2e5ff99-bd80-45e8-aa7ae55f0b5b42dc/plaguicidas-prohibidos.aspx>.

Komine, T., & Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. *IEEE transactions on Consumer Electronics*, 50(1), 100-107.

KTH (s.f). Kungliga Tekniska Högskolan. GL55 Series Photoresistor. CdS Photoresistor Manual . Retrieved from. <https://www.kth.se/social/files/54ef17dbf27654753f437c56/GL5537.pdf>

Leandro, A. (2013). La agricultura urbana en Bogotá: como llegar a tener un modelo de negocio.

Llamas, L. (2016). Medir cantidad de luxes con arduino y luxómetro BH1750. Obtenido de: <https://www.luisllamas.es/medir-cantidad-de-luxes-con-arduino-y-el-luxometro-bh1750/>

Mactronica. (s.f.) Sensor de distancia de ultrasonido HC-SR04. Obtenido de <https://www.mactronica.com.co/sensor-ultrasonido-distancia-hcsr04-45588466xJM>

Mattila, P., Suonpää, K., & Piironen, V. (2000). Functional properties of edible mushrooms. *Nutrition*, 16(7), 694-696.

Merlo, R. P., & Mata, G. (2005). Cultivo y selección de cepas de *Pleurotus ostreatus* y *P. pulmonarius* en viruta de pino: obtención de nuevas cepas y evaluación de su producción. *Revista mexicana de micología*, (20), 61-70.

Mew, E. J., Padmanathan, P., Konradsen, F., Eddleston, M., Chang, S. S., Phillips, M. R., & Gunnell, D. (2017). The global burden of fatal self-poisoning with pesticides 2006-15: systematic review. *Journal of affective disorders*, 219, 93-104.

Microkits Electrónica (s.f). Sensor ultrasonido HR-SC04. Obtenido de: <https://www.microkitselectronica.com/media/attachment/file/h/c/hcsr04.pdf>

Miles, P y Chang, S. *Biología de las setas*. Ed. World Scientific: Hong Kong; 1999.

Mora Amado, A. F. (2017). Plan de negocios para la creación de una empresa de comercialización de hongos *pleurotus ostreatus*.

Mouser Electronics (2011). Ambient Light Sensor IC Series Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC. BH1750FVI. RHOM Semiconductor. Retrieved from. <https://www.mouser.com/ds/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>

Mouser Electronics (s.f). DHT11, DHT22 and AM2302 Sensors. Adafruit Industries. Retrieved from <https://www.mouser.com/ds/2/737/dht-932870.pdf>

Mouser Electronics (s.f). Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75) Humidity and Temperature Sensor IC. Sensirion the sensor company. Retrieved from http://www.mouser.com/ds/2/682/Sensirion_Humidity_SHT7x_Datasheet_V5-469726.pdf

Naylampmechatronics. (2017). Tutorial de Arduino y sensor ultrasónico HC-SR04 Sensor Obtenido de https://naylampmechatronics.com/blog/10_Tutorial-de-Arduino-y-sensor-ultras%C3%B3nico-HC-S.html

Neufert, E. (1995). *El Arte de Proyectar en Arquitectura*. 14 Edición en Español. Barcelona: Gustavo.

Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., & Hens, L. (2016). Chemical pesticides and human health: the urgent need for a new concept in agriculture. *Frontiers in public health*, 4, 148.

Olalekan, O. B. (2017). Development of a Sim800I Based Reprogrammable Household Smart Security System with Recipient Phone Call Alert. *International Journal*, 4(1), 15-20.

Ongley, E. D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos (No. 55). Food & Agriculture Organization (FAO).

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2011). Curso de Autodiagnóstico, tratamiento y Prevención de intoxicaciones agudas por Plaguicidas.

Padilla, R., Quintero-Rosas, V., & Díaz-Ramírez, A. (2015). Monitoreo y localización de personas extraviadas utilizando Arduino y GSM/GPS. *Industrial Data*, 18(1).

Peña, A. C., & Sánchez, J. M. G. (2012). Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora. AENOR.

Perero Lainez, C. A. (2014). Estudio del proceso artesanal y propuesta para implementar una empresa de fabricación de muebles de baño y cocina con granito cultivado y fibra sintética (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería Industrial.).

Pérez, B. J., Koo, J. M., & Carmona, J. (2014). Automatización, monitoreo y control remoto de un sistema de riego agrícola con código abierto. In Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.

Perry, A. S., Yamamoto, I., Ishaaya, I., & Perry, R. Y. (2013). Insecticides in agriculture and environment: retrospects and prospects. Springer Science & Business Media.

Pinto Contreras, M. (2016). Producción limpia de alimentos: el gran desafío de la agricultura del norte de Chile. *Idesia (Arica)*, 34(2), 3-4.

Piñeiro, M. M. (2000). Metrología: introducción, conceptos e instrumentos. Universidad de Oviedo.

Presidencia de la República (2015). Decreto 284 del 2015. . Obtenido de http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%20284%20DEL%2015%20FEBRERO%20DE%202018.pdf?fbclid=IwAR2c77mFS_t04K0TLjvxGDHInE97FXcMVPN_PC_Ds0iflQN2mrqG90jXGHc

Prometec. ESP32 WiFi Bluetooth. (s.f.). Obtenido de <https://www.prometec.net/producto/esp32-wifi-bluetooth/#>

Raja, S. P., Rozario, A. R., Nagarani, S., & Kavitha, N. S. (2018). Intelligent Mushroom Monitoring System. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.33), 1238-1242.

Rawal, S. (2017). Lot based smart irrigation system. *International Journal of Computer Applications*, 159(8), 880-886.

Reyna, T., Reyna, S., Lábaque, M., Fulginiti, F., Riha, C., & Linares, J. (2011). Importancia de la determinación de la humedad en estudios de infiltración y escorrentía superficial para períodos largos. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 6(2).

Rodriguez, J. D., & Sanabria, N. F. (2012). Control de temperatura y humedad para cultivo de hongos comestibles shiitake. *Visión electrónica*, 6(1), 104-114.

Sánchez, C. (2010). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(5), 1321-1337.

Santacoloma, P., & Cuevas, R. (2011). Cost-effective management tools for ensuring food quality and safety. For small and medium agro-industrial enterprises. 5 modules. FAO.

Scharfy, D., Boccali, N., & Stucki, M. (2017). Clean Technologies in Agriculture—How to Prioritise Measures?. *Sustainability*, 9(8), 1303.

Setas de Siecha (2019). Cultivo de hongos gourmet y medicinales. Obtenido de Setas de Siecha: <https://www.setasdesiecha.com/>

Shock, C. C., & Welch, T. (2013). El riego por goteo: Una introducción.

SparkFun Electronis. (s.f.). Digital-output relative humidity & temperature sensor/module (DHT22). Obtenido de <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>

Stamets, P. (2011). Growing gourmet and medicinal mushrooms. Ten Speed Press.

Stull, R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(11), 2267-2269.

Trienekens, J., & Zuurbier, P. (2008). Quality and safety standards in the food industry, developments and challenges. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 107-122.

UElBosque. (2018). Bioingeniería. Obtenido de Universidad El Bosque: <https://www.uelbosque.edu.co/ingenieria/carrera/bioingenieria>

United Nations. (2015). Sustainable Development Goals. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>

Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2015). En 20 años Colombia aumentó uso de plaguicidas en un 360 %. Unimedios. Agencia de Noticias UN. Salud.

Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (s.f). Instalaciones de ventilación. Física. Obtenido de <http://www.aq.upm.es/Departamentos/Fisica/UD-instalaciones/Doc02.pdf>

Vargas, Y. S., & Molina, Y. W. (2017). Diseño de un sistema de monitoreo y control de cámaras de incubación y fructificación para la producción de hongos comestibles y medicinales. *Boliviano de Ciencias*. 38(13), 44-53.

VIDAL TORRÓ, J. (2016). Automatización y economización de un invernadero (Doctoral dissertation).

Villamil Gonzalez, H. U. (2016). 309696-Módulo de microprocesadores & microcontroladores.

Yacuzzi, E., & Martín, F. (2003). QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos (No. 234). Serie Documentos de Trabajo, Universidad del CEMA: Área: negocios.

Yang, J. H., Lee, Y. M., Bae, S. G., Jacobs Jr, D. R., & Lee, D. H. (2012). Associations between organochlorine pesticides and vitamin D deficiency in the US population. *PloS one*, 7(1), e30093.

Yarke, E. (Ed.). (2005). Ventilación natural de edificios: fundamentos y métodos de cálculo para aplicación de ingenieros y arquitectos. Nobuko.

Zamux Electrónica. (s.f.). LCD OLED 0,91 PULGADAS 128X32. Obtenido de <http://zamux.co/es/lcd-y-display/900-lcd-oled-091-pulgadas-128x32.html>

Zepeda–Bastida, A., Ojeda-Ramirez, D., Soto-Simental, S., Rivero-Perez, N., & Ayala-Martínez, M. (2016). Comparison of antibacterial activity of the spent substrate of *Pleurotus ostreatus* and *Lentinula edodes*. *Journal of Agricultural Science*, 8(4), 43-49.