

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE INCUBACIÓN PARA
OPTIMIZAR LA ECLOSIÓN DE HUEVOS DE GALLINA MEDIANTE EL CONTROL
DE PARÁMETROS AMBIENTALES**



**Deivid Emmanuel Peña Peña
Jesús Miguel Campo Montenegro**

Director:

MsC. Carlos Iván Vásquez Valencia

Codirector:

Ph.D(c). Andrés Felipe Solís Pino

Corporación Universitaria Comfacaucá

Facultad de ~~ingeniería~~Ingeniería

Ingeniería Mecatrónica

Grupo de ~~investigación~~Investigación en Sistemas Inteligentes (GSI)

Popayán, 2025

**DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE INCUBACIÓN PARA
OPTIMIZAR LA ECLOSIÓN DE HUEVOS DE GALLINA MEDIANTE EL CONTROL
DE PARÁMETROS AMBIENTALES**

**Deivid Emmanuel Peña Peña
Jesús Miguel Campo Montenegro**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar por el
título de Ingeniero Mecatrónico

Director:

MsC. Carlos Iván Vásquez Valencia

Codirector:

Ph.D (c). Andrés Felipe Solís Pino

Corporación Universitaria Comfacaucua

Facultad de [Ingeniería](#)

Ingeniería Mecatrónica

Grupo de [Investigación](#) en Sistemas Inteligentes (GISI)

Popayán, 2025

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Ciudad y Fecha (día, mes, año) (Fecha de entrega)

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo, en primer lugar, a Dios, por guiarnos, darnos fortaleza y sabiduría en cada paso de este proceso. A nuestras familias, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser nuestro pilar en los momentos más difíciles.

Agradecemos a nuestros maestros, por compartir su conocimiento y dedicación, y a nuestros amigos, por su ánimo y compañía en este camino.

Finalmente, a todas las personas que, de una forma u otra, han sido parte de esta travesía. Este logro es de todos ustedes.

Autor

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecer a Dios, quien nos ha dado la fortaleza, sabiduría y perseverancia para completar este proyecto. Sin su guía y bendiciones, no habríamos llegado hasta aquí.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional, su amor y comprensión en cada paso de este proceso. Gracias por ser nuestro refugio y por creer en nosotros, incluso en los momentos más difíciles.

A nuestros asesores, quienes, con su paciencia, dedicación y conocimientos, nos guiaron en el desarrollo de esta investigación. Su orientación fue fundamental para que este proyecto se materializara.

A nuestros amigos y compañeros de estudio, por estar siempre a nuestro lado, brindándonos ánimo y apoyo. Su compañía nos ayudó a mantener el equilibrio entre el esfuerzo académico y los momentos de descanso necesarios.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de alguna manera, contribuyeron con su tiempo, conocimientos y motivación para que este trabajo sea una realidad. A todos ustedes, les expresamos nuestra más sincera gratitud.

Tabla de contenido

CAPITULO 1	18
1.1. Introducción.....	18
1.2. Planteamiento del problema.....	19
1.3. Justificación.....	21
1.4. Objetivos	23
1.4.1. Objetivo general	23
1.4.2. Objetivos específicos	23
1.5. Metodología	24
1.5.1. Fase1: Planteamiento Del Problema.....	24
1.5.2. Fase2: Construcción Del Modelo Teórico	24
1.5.3. Fase3: Validación Del Dispositivo Propuesto.....	25
1.5.4. Fase 4: Introducción De Las Conclusiones En La Teoría	25
1.5.5. Fase 5: Documentación	25
CAPITULO 2	27
2.1. Marco Teórico y Conceptual	27
2.1.1. Definiciones relacionadas con el proceso de incubación	27
2.1.1.1 Incubación Natural	27
2.1.1.2 Etapas claves en el proceso de incubación	27
2.1.1.3 Incubación Artificial de Huevos	27
2.1.1.4 Humedad relativa.....	28
2.1.1.5 Temperatura	28
2.1.1.6 Volteo de huevos	28
2.1.1.7 Ventilación forzada	29
2.1.1.8 Eclosión de huevos.....	29
2.1.2. Definiciones relacionadas con la tecnología	29
2.1.2.1 Controlador PID	29
2.1.2.2 Control on off con histéresis.....	30
2.1.2.3 Motor paso a paso	30
2.1.2.4 Sensor De Temperatura	30
2.1.2.5 Sensor de humedad.....	31
2.1.2.6 Sensor de CO2	31
2.2. Antecedentes	31
CAPITULO 3	34

Identificación de requerimientos funcionales y Modelamiento de los componentes estructurales.....	34
3.1. Bocetos a Mano Alzada	35
3.2. Modelado CAD y Simulación	37
3.2.1. Comportamiento del flujo	37
3.2.2. Análisis Estático	42
3.2.2.1 Carga aplicada.....	43
3.2.2.2 Simulación y resultado.....	44
3.2.2.3 Análisis de los datos de la simulación	47
3.3. Diseño CAD del sistema	47
3.3.1. Diseño de la puerta	47
3.3.1.1 Estructura Metálica	48
3.3.1.2 Láminas de Madera	49
3.3.1.3 Material Aislante	49
3.3.1.4 Visores.....	50
3.3.2. Soporte para la resistencia eléctrica.	51
3.3.3. Sistema de ventilación	52
3.3.3.1 Soporte de ventiladores.....	53
3.3.3.2 Media luna	53
3.3.3.3 Canal de Aire	54
3.3.3.4 Sistema de oxigenación.....	55
3.3.4. Caja de control.....	56
3.3.5. Diseño del sistema de volteo de los huevos	57
3.3.6. Ensamble final de sistema de incubación	61
3.4. Selección de Materiales y Actuadores	62
3.4.1. Soporte estructural de la incubadora	63
3.4.2. Paredes de la Incubadora.....	64
3.4.3. Selección de la resistencia	65
3.4.3.1 Perdidas de calor atreves de las paredes.....	66
3.4.3.2 Energía necesaria para elevar la temperatura del aire en el recinto de incubación	69
3.4.3.3 La energía necesaria para elevar la temperatura de los huevos	70
3.4.4. Selección del motor	72
3.4.4.1 Determinación de la fuerza ejercida por los huevos	73
3.4.4.2 Cálculo del torque.....	73

3.4.4.3	Análisis del torque del motor	<u>74</u>
3.4.4.4	Motor utilizado.....	<u>75</u>
3.4.5.	Selección del humidificador.....	<u>76</u>
3.4.6.	Buzzer	<u>82</u>
3.4.7.	Sirena.....	<u>83</u>
3.5.	Selección de Sensores.....	<u>83</u>
3.5.1.	Sensor de temperatura	<u>83</u>
3.5.2.	Sensor de Humedad	<u>84</u>
3.5.3.	Sensor de Co2	<u>85</u>
3.5.4.	Módulo de reloj DS3231.....	<u>86</u>
3.6.	Diseño Electrónico	<u>86</u>
3.6.1.	Controlador	<u>87</u>
3.6.2.	Control de la resistencia.....	<u>88</u>
3.6.3.	Optoacoplador MOC3021	<u>89</u>
3.6.4.	Optoacoplador 4N25	<u>90</u>
3.6.5.	Sensores Dht22	<u>90</u>
3.6.6.	Pantalla LCD	<u>91</u>
3.6.7.	Pulsadores	<u>92</u>
3.6.8.	Buzzer	<u>92</u>
3.6.9.	Control con relés y optoacopladores.....	<u>93</u>
3.6.10.	Diseño PCB	<u>93</u>
3.7.	Interfaz usuario maquina.....	<u>95</u>
3.7.1.	Descripción del Diagrama de Flujo de la Interfaz de Usuario	<u>96</u>
3.7.1.1	Pantalla Principal (Menú 1):	<u>96</u>
3.7.1.2	Menú de Configuración (Menú 2):.....	<u>96</u>
3.7.1.3	INICIO (Menú 3):.....	<u>97</u>
3.7.1.4	INCUBACIÓN (Menú 4):	<u>97</u>
3.7.1.5	NACEDORA (Menú 5):	<u>98</u>
3.7.1.6	CALIBRAR SENSORES (Menú 6):.....	<u>98</u>
3.7.1.7	CALIBRAR BANDEJA (Menú 7):	<u>98</u>
3.7.1.8	GUARDAR:	<u>99</u>
3.8.	Implementación física del sistema.....	<u>99</u>
3.8.1.	Implementación Mecánica.....	<u>99</u>
3.8.1.1	Estructura metálica	<u>99</u>
3.8.1.2	Cajón fabricado en tablero de densidad media (MDF).....	<u>100</u>

3.8.1.3 Aislamiento térmico (poliestireno expandido y Thermolon)	101
3.8.1.4 Sistema de ventilación	102
3.8.1.5 Puerta de acceso al sistema de incubación	103
3.8.1.6 Sistema de volteo de huevos	106
3.8.1.7 Caja de control	109
3.8.2. Implementación Electrónica	110
Placa de circuito impreso (PCB)	110
3.9. Control de variables	111
3.9.1. Control en el sistema de volteo	111
3.9.1.1 Estados del sistema	112
3.9.1.2 Frecuencia y duración del volteo	113
3.9.1.3 Consideraciones técnicas adicionales	113
3.9.2. Control on-off de temperatura y humedad Por histéresis	113
CAPITULO 4	116
4.1. Descripción del Proceso de Validación	116
4.1.1. Variables a Evaluar	116
4.1.2. Condiciones Experimentales	119
4.1.2.1 Número de Huevos:	119
4.1.2.2 Duración del Proceso:	120
4.1.2.3 Configuración Inicial y Calibración	121
4.1.2.4 Calibrar Temperatura	121
4.1.2.5 calibración de Humedad:	122
4.1.2.6 Calibración de las Bandejas de Rotación:	123
4.2. Resultados de la Validación	124
4.2.1. Presentación de Datos	124
4.2.2. Proceso experimental de validación	128
Experimento de incubadora Automatizada	132
4.2.3. Resultados del Experimento de Incubación	136
4.2.3.1 Resultados de la incubadora casera	136
4.2.3.2 Resultados de la incubadora Automatizada	137
4.2.3.4 Cálculo de la Tasa de Eclosión Ajustada	138
4.2.3.5 Análisis de Mortalidad Embrionaria	138
4.2.3.6 Interpretación de los Resultados	138
4.3. Análisis Comparativo y Discusión	139
4.3.1. Comparación con Dispositivos Comerciales	139

4.3.1.1 Análisis de Rentabilidad de la Incubadora Desarrollada	<u>140</u>
4.3.2. Aspectos Positivos del Sistema	<u>141</u>
4.3.3. Aspectos Para Mejorar.....	<u>142</u>
5. Conclusiones y trabajos futuros	<u>143</u>
5.1. Conclusiones.....	<u>144</u>
5.2. Trabajos futuros	<u>145</u>
6 referencias Bibliográficas	<u>147</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Etapas de la metodología.....	26
Figura 2.	Bocetos a mano alzada que muestran la distribución de los ventiladores y la estructura general de la incubadora.	~~36~~
Figura 3.	Boceto final seleccionado del diseño de la incubadora.	~~37~~
Figura 4.	Primer boceto con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.	~~38~~
Figura 5.	Segundo boceto con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.	~~39~~
Figura 6.	Tercer boceto con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.	~~40~~
Figura 7.	Boceto Final con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.	~~41~~
Figura 8.	Simulación en solidword Simulation de la tensión de Von Mises	~~44~~
Figura 9.	Simulación de solidword Simulation del desplazamiento total.....	~~45~~
Figura 10.	Simulación en solidword Simulation del factor de seguridad	~~46~~
Figura 11.	Diseño CAD de la puerta del sistema de incubación	~~48~~
Figura 12.	Diseño CAD Marco de hierro reforzado para el soporte de la puerta de la incubadora.	~~48~~
Figura 13.	Diseño CAD de láminas de MDF configuradas para soportar y reforzar de manera eficiente la estructura de la puerta de la incubadora	~~49~~
Figura 14.	Diseño CAD de láminas de poliestireno expandido para el aislamiento térmico de la puerta de la incubadora	~~50~~
Figura 15.	Diseño CAD de los visores del interior de la incubadora.	~~50~~
Figura 16.	Diseño CAD vista explosionado de la puerta del sistema de incubación	~~51~~
Figura 17.	Diseño en vista isométrica del soporte de la resistencia.....	~~52~~
Figura 18.	Medias conceptuales del soporte de la resistencia dadas en milímetros	~~52~~
Figura 19.	Ensamble del soporte para los ventiladores	~~53~~
Figura 20.	Curva para el sistema de ventilación	~~54~~
Figura 21.	Canal de distribución para el sistema de ventilación	~~54~~
Figura 22.	Sistema para el flujo del aire dentro de la incubadora	~~55~~
Figura 23.	Orificios de oxigenación del sistema.....	~~56~~
Figura 24.	Medidas conceptuales de la caja de control	~~56~~

Figura 25.	Componentes integrados en la caja.....	57
Figura 26.	Bandeja comercial.....	58
Figura 27.	Medidas del Soporte principal del sistema de volteo	58
Figura 28.	Base donde van a ir sujetas las bandejas	59
Figura 29.	Medida y diseño conceptual de las bandejas.....	60
Figura 30.	Mediadas de barra de transmisión del sistema de volteo en SolidWorks. 60	
Figura 31.	Ensamble conceptual del sistema de volteo	61
Figura 32.	Ensamble final del sistema con todos los componentes	62
Figura 33.	Soporte estructural de la incubadora.	63
Figura 34.	paredes de la incubadora.....	64
Figura 35.	Temperatura media mínima Popayán, Colombia.	65
Figura 36.	Energía disipada en la puerta de la incubadora se calculó en dos secciones: la parte de MDF y la ventanilla	68
Figura 37.	Resistencia de silicona 100w.	72
Figura 38.	Motor de plumillas utilizado para el sistema de volteo	76
Figura 39.	Presión de vapor de agua líquida y hielo a varias temperaturas.	78
Figura 40.	buzzer utilizado en el sistema de incubación.	82
Figura 41.	Sirena utilizada en el sistema de incubación.....	83
Figura 42.	Sensor de temperatura DHT22 utilizado en la incubadora.....	84
Figura 43.	Sensor de dióxido de carbono (CO ₂) MQ135.....	85
Figura 44.	Módulo de reloj DS3231.....	86
Figura 45.	Esquemático general del circuito eléctrico de la incubadora.....	87
Figura 46.	Arduino Mega r3.....	88
Figura 47.	Circuito de control de potencia de la resistencia y detector de cruce por cero. 89	
Figura 48.	Optoacoplador MOC 3021	89
Figura 49.	Optoacoplador 4N25	90
Figura 50.	Conexión de sensores DHT22 en el circuito.	91
Figura 51.	Pantalla LCD 20x4 integrada en el circuito	91
Figura 52.	Botones con configuración pull-up integrados al circuito eléctrico.	92
Figura 53.	Integración del buzzer activo en el circuito.	93
Figura 54.	Sistema de control con relés y optoacopladores.....	93
Figura 55.	diseño completo del sistema de control en proteus	94
Figura 56.	Diseño conceptual de la pcb en proteus	95

Figura 57.	Diagrama de flujo de la interfaz de usuario.....	<u>96</u>
Figura 58.	Pulido de la estructura metálica del sistema de incubación.	<u>99</u>
Figura 59.	Soldado de la estructura metálica del sistema de incubación.....	<u>100</u>
Figura 60.	Cajón de MDF del sistema de incubación.....	<u>100</u>
Figura 61.	Ensamble de la estructura con el cajón de MDF unido con tornillos..	<u>101</u>
Figura 62.	Recubriendo la estructura con el poliestireno expandido.	<u>102</u>
Figura 63.	Ensamble tipo sándwich asegurado con tornillo y sellado con pegamento. <u>102</u>	
Figura 64.	Diseño final de los soportes para los ventiladores.	<u>103</u>
Figura 65.	Ensamble total del sistema de ventilación dentro de la incubadora..	<u>103</u>
Figura 66.	Soldando la estructura metálica de la puerta para el sistema de incubación. <u>104</u>	
Figura 67.	Rellenado de poliestireno expandido de 1m de grosor la estructura metálica. <u>104</u>	
Figura 68.	Ventanilla de la puerta para la visualización del proceso de incubación <u>105</u>	
Figura 69.	Bisagras ubicadas estratégicamente entre la puerta y la incubadora. <u>105</u>	
Figura 70.	Rueda utilizada en la incubadora automatizada.	<u>106</u>
Figura 71.	Sistema de volteo de huevos acoplado con las bandejas hechas en acrílico. <u>107</u>	
Figura 72.	Sistema de volteo ensamblado la estructura y soporte de las bandejas. <u>108</u>	
Figura 73.	Tornillos pasantes empleados para asegurar las bandejas al soporte. <u>108</u>	
Figura 74.	Sistema piñón cadena utilizado para el volteo de los huevos a 45°... <u>109</u>	
Figura 75.	Diseño en físico de la caja de control.	<u>110</u>
Figura 76.	Diseño de pcb en físico.....	<u>110</u>
Figura 77.	Pcb con todos los componentes integrados	<u>111</u>
Figura 78.	Diagrama de flujo del control on-off con histéresis.	<u>114</u>
Figura 79.	Diagrama de Control On-Off con Histéresis.....	<u>115</u>
Figura 80.	Ubicación de los sensores en cada bandeja.....	<u>117</u>
Figura 81.	Medición de la temperatura en el interior de la incubadora con multímetros <u>118</u>	
Figura 82.	Verificación de renovación de aire dentro de la incubadora	<u>118</u>

Figura 83.	Verificación del Angulo dentro del sistema de incubación a través de la ventanilla	119
Figura 84.	Distribución de los huevos en las bandejas: 15 en las tres primeras bandejas y 14 en la última.	120
Figura 85.	Ubicación de la incubadora durante el proceso de incubación	121
Figura 86.	Calibración de los sensores DHT22 en la interfaz de usuario	122
Figura 87.	Interfaz de Calibración de Humedad	123
Fuente:	Elaboración Propia	123
Figura 88.	Cambio de Temperatura En función del tiempo	124
Figura 89.	Evolución del error respecto al Setpoint.	126
Figura 90.	Cambio de Humedad en función del tiempo	127
Figura 91.	Evolución del error de humedad relativa respecto al Setpoint	128
Figura 92.	Incubadora casera	129
Figura 93.	Posición del ventilador y la resistencia	129
Figura 94.	Incubadora preparada para iniciar proceso de incubación	130
Figura 95.	Pollos en la fase final de la incubadora casera	131
Figura 96.	Pollos que nacieron exitosamente	131
Figura 97.	distribución de los huevos dentro de la incubadora	132
Figura 98.	Canastas utilizadas para el nacimiento de los polluelos después de 18 días de incubación.	133
Figura 99.	Nacimiento de los polluelos al día 21 de incubación	134
Figura 100.	Muestra de los 40 pollitos que eclosionaron distribuidos equitativamente en 3 canastas	135
Figura 101.	Mortalidad de los polluelos en la fase final de incubación	136
Figura 102.	Resultados del proceso de incubación: distribución de nacimientos, mortalidad embrionaria y huevos infértiles en incubadora casera	136
Figura 103.	Resultados del proceso de incubación: distribución de nacimientos, mortalidad embrionaria y huevos infértiles en incubadora automatizada	137

LISTAS DE TABLAS

Tabla 1.	Dimensiones del material Polimetilmetacrilato	~~42~~
Tabla 2.	Propiedades físicas y mecánicas del polimetilmetacrilato (acrílico)	~~42~~
Tabla 3.	Métricas de error de control de temperatura en incubadora.....	~~125~~
Tabla 4.	Métricas de error de Control de Humedad en Incubadora.....	~~127~~
Tabla 5.	Incubadoras comerciales.....	~~140~~

RESUMEN

[Iniciar contextualizando la problemática a resolver](#)

Se desarrolló una incubadora automática para huevos de gallina criolla, controlada por un Arduino Mega y equipada con sensores DHT22, ventiladores axiales, un humidificador ultrasónico y un motor de volteo, diseñada para operar sin intervención humana. Las condiciones de incubación se establecieron en 37.5 °C y 55 % de humedad relativa durante los primeros 18 días, y en 37.2 °C con 75 % durante los últimos 3 días. Las pruebas se realizaron en un recinto ubicado en Popayán, obteniendo un error absoluto medio de 0.05 °C en temperatura y 0.19 % en humedad. Se logró una tasa de eclosión del 87 %, mientras que una incubadora casera alcanzó solo un 22.9 %. Se diseñaron bandejas con capacidad total para 352 huevos, fabricadas en acrílico y malla plástica, con un sistema de volteo automatizado cada 3 horas a 45 grados. El diseño estructural y las simulaciones de flujo de aire se desarrollaron en SolidWorks, optimizando la distribución térmica interna. Esta solución busca beneficiar a pequeños y medianos avicultores, ofreciendo una alternativa accesible, eficiente y adaptada a sus necesidades.

ABSTRACT

An automatic incubator for Creole hen eggs was developed, controlled by an Arduino Mega and equipped with DHT22 sensors, axial fans, an ultrasonic humidifier and a turning motor, designed to operate without human intervention. Incubation conditions were set at 37.5 °C and 55 % relative humidity for the first 18 days, and at 37.2 °C with 75 % for the last 3 days. The tests were carried out in an enclosure located in Popayán, obtaining a mean absolute error of 0.05 °C in temperature and 0.19 % in humidity. A hatching rate of 87 % was achieved, while a home incubator achieved only 22.9 %. Trays with a total capacity of 352 eggs were designed, made of acrylic and plastic mesh, with an automated turning system every 3 hours at 45 degrees. The structural design and air flow simulations were developed in SolidWorks, optimizing the internal thermal distribution. This solution seeks to benefit small and medium-sized poultry farmers, offering an accessible, efficient alternative adapted to their needs.

CAPITULO 1

1.1. Introducción

En 2018, la producción mundial de [carne de](#) pollo alcanzó un récord de 95,5 millones de toneladas, con una tasa de crecimiento anual del 2,0%[1]. Según las proyecciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se espera que la producción de pollo siga creciendo a una tasa anual del 3% hasta 2023 (15%)[2]. Este crecimiento es especialmente significativo en países como Colombia, donde la producción avícola desempeña un papel destacado en la economía[3]. Dado que Colombia es el sexto productor mundial de pollo, sólo por detrás de Estados Unidos, Brasil, México, Canadá y Argentina. En cuanto a la producción de huevos de mesa, Colombia ocupa el cuarto lugar después de Estados Unidos, Brasil y México[4].

La producción avícola en Colombia también enfrenta varios retos y oportunidades que deben ser abordados para garantizar su sostenibilidad y competitividad[5]. Algunos de estos retos son: mejorar la bioseguridad y el control de enfermedades, reducir el uso de antibióticos y residuos, mejorar el bienestar animal y la protección del medio ambiente, satisfacer las demandas y expectativas de los consumidores, adaptarse al cambio climático y a las fluctuaciones del mercado, y aumentar la innovación y la investigación [6].

Dada la importancia de la producción avícola para la economía colombiana y el sustento de miles de familias dedicadas a la avicultura, es fundamental mejorar los procesos de producción avícola. Una solución propuesta es el diseño e implementación de una incubadora de huevos que mantenga las condiciones óptimas para el desarrollo de los polluelos, para esto integra un sistema de control proporcional-integral (PI) para regular con precisión la temperatura a 37 grados centígrados. Además, se incluirá un sistema de control de la humedad para garantizar el correcto desarrollo de los embriones. Este documento presenta la incubadora de huevos de gallina como herramienta fiable y eficaz para mejorar los procesos de desenvolvimiento de las familias avícolas.

1.2. Planteamiento del problema

Una buena nutrición es esencial para proporcionar al organismo los nutrientes necesarios para su funcionamiento óptimo. Además, fortalece el sistema inmunológico, lo que ayuda a prevenir enfermedades y promueve un crecimiento y desarrollo adecuados en los seres humanos [1]. En este sentido, la carne de pollo (58 g/día) tiene un alto contenido de proteínas (8,6%) y bajo contenido de grasa (3,2% de grasa total, 3,1% de AGS y 10,2% de colesterol). También se destaca su aporte de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI), equivalentes de niacina y vitamina B6. En cuanto a los huevos, si se consume 35 g/día aporta un 2,8% de la ingesta total de grasa, 2,7% de AGS y 27,1% de colesterol. Además, este producto avícola destaca por su contenido de riboflavina (7,8%), ácido fólico (8,1%), retinol (8,5%), vitamina B12 (9,3%) y vitamina D (15%)[2].

Estos datos resaltan la importancia nutricional del pollo y los huevos. Además, a nivel comercial existen un crecimiento en la producción mundial de pollo, liderado por países como China, EE. UU., Brasil y México [3]. En esta línea, en Colombia la industria avícola es crucial para la economía, donde se ocupa el sexto lugar mundial en producción de pollo y el cuarto en producción de huevos. La avicultura en Colombia genera más de 350 mil empleos, siendo el sustento de más de 250 mil personas en 300 municipios, principalmente a través de granjas familiares y de traspatio, que representan el 98% de los predios avícolas en el país [4].

Según el último informe del Rabobank, se anticipa que el mercado avícola mundial experimentará un crecimiento moderadamente positivo en 2024, proyectándose entre el 1,5% y el 2%. Aunque esta cifra representa una disminución en comparación con el promedio anual a largo plazo del 2,5%, señala una mejora con respecto al año anterior, 2023, cuando el crecimiento fue del 1,1% [5].

Según datos proporcionados por la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI), en el Cauca se registran un total de 155 granjas avícolas, distribuidas de la siguiente manera: 133 de ellas (85.8%) se dedican al engorde de pollo, 20 (12.9%) a la producción de huevos, y los 2 restantes (1.3%) se centran en la reproducción. Entre los municipios con el mayor número de granjas, se destacan Santander de Quilichao

Comentado [JM1]: Verificar si existe una proyección a 2026 o 2025

con 46 (29.7%), Caloto con 26 (16.8%), Timbío con 24 (15.5%), Caldonó con 19 (12.3%), Popayán con 11 (7.1%), y Cajibío con 7 (4.5%) [6].

Teniendo en cuenta las cifras presentadas, es de vital importancia aportar a los pequeños productores del departamento del Cauca alternativas tecnológicas que potencien su productividad y sustento económico. La incubación de huevos fértiles es una etapa crítica que define en gran medida la cantidad de polluelos viables obtenidos y, por ende, la producción de carne y huevos para el consumo [7].

Sin embargo, los avicultores de pequeña escala en la región enfrentan dificultades en este proceso al no contar con equipos especializados de incubación o alternativas tecnológicas que apoyen este proceso productivo [8]. Ya que realizan la incubación de manera rudimentaria, con escaso control ambiental y resultados aleatorios. Esto se traduce en mermas importantes de inventario y menores ingresos para sus hogares.

A la actualidad en el Departamento del Cauca, los avicultores se basan principalmente en dos métodos de incubación: la incubación natural, donde las gallinas se encargan del proceso, y la incubación poco tecnificada, que implica el uso de incubadoras caseras. Sin embargo, estos métodos tradicionales presentan limitaciones en el control preciso de variables clave de incubación, lo que dificulta obtener tasas de eclosión y calidad de los pollos satisfactorias [9].

En este sentido, la tecnificación del proceso es un valor importante a la producción avícola, donde las incubadoras automatizadas y de precisión, adaptadas a sus necesidades, mejoraría sustancialmente las tasas de eclosión de huevos fértiles. Asimismo, al democratizar el acceso a esta tecnología crítica, se potenciaría la producción local de proteínas de origen avícola, con beneficios sociales y económicos asociados[10].

Teniendo en cuenta la problemática expuesta, y como principal preocupación aportar a la industria avícola Caucana se propone la siguiente pregunta de investigación: **¿Cómo desarrollar un sistema tecnológico que apoye el proceso productivo de la industria avícola caucana mediante el control de condiciones internas durante la incubación?**

1.3. Justificación

Esta investigación se centra en el diseño de un prototipo de incubadora automatizada que apoye el proceso de incubación de huevos fértiles de gallina, se toman en cuenta como variables críticas a controlar dentro del entorno del proceso de incubación la temperatura, humedad relativa, rotación de los huevos, control de CO₂, y [ventilación](#) forzada, que son variables que determinan en gran medida el porcentaje de éxito en la incubabilidad de los huevos fértiles [11].

Aunque existen incubadoras comerciales, mayormente extranjeras, su costo elevado y la falta de control completo de variables desafían su viabilidad para los avicultores locales. Como resultado, muchos optan por comprar aves directamente a empresas, aumentando sus costos operativos.

La avicultura bien administrada es un negocio rentable que puede tener un impacto significativo en las economías locales del departamento del Cauca. Por consiguiente, especialmente para los pequeños productores de traspatio, estos productores, al implementar prácticas avícolas efectivas, pueden asegurar ingresos constantes y proporcionar un suministro alimenticio vital en forma de huevos y carne de pollo para sus familias y comunidades [12].

La tecnificación y mejora continua de estos productores no solo impulsan el desarrollo económico local, sino que también contribuyen directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En particular, el ODS 1: Fin de la Pobreza y el ODS 2: Hambre Cero se ven beneficiados. Al fortalecer las capacidades de los pequeños productores, se les empodera para aumentar sus ingresos y garantizar la seguridad alimentaria en sus comunidades. Invertir en la tecnificación de los pequeños productores avícolas del Cauca es una estrategia clave para promover un desarrollo sostenible y equitativo en la región[13]. En consecuencia, esta inversión no solo impulsa el crecimiento económico local y la inclusión social en áreas rurales, sino que también tiene un impacto positivo en la reducción de la pobreza y el hambre

Además, es importante considerar que el departamento del Cauca presenta características geográficas y climáticas únicas que pueden influir en el proceso de incubación de huevos fértiles. La variabilidad en la altitud, las condiciones de

temperatura y la humedad relativa pueden afectar significativamente el desarrollo embrionario y, por ende, la viabilidad de los huevos[14]. Por lo tanto, diseñar una incubadora automatizada adaptada específicamente a estas condiciones locales es esencial para maximizar la tasa de eclosión y garantizar la salud y el desarrollo óptimo de los embriones aviares.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar una incubadora automatizada para huevos de gallina que favorezca las condiciones de formación del embrión dentro del cascarón hasta el proceso de eclosión.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Modelar los componentes estructurales y las condiciones de la incubadora mediante software especializado, con base en los requerimientos del sistema identificados.
2. Implementar un adecuado control de temperatura, humedad, ventilación y rotación de acuerdo con las condiciones específicas identificadas, que garanticen el desarrollo apropiado de los huevos de gallina.
3. Validar el sistema de incubación propuesto mediante la incubación de huevos de gallina fértiles.

1.5. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos en el proyecto denominado “Diseño de un sistema de incubación avanzado para optimizar la eclosión de huevos de gallina mediante control preciso de parámetros ambientales” se utiliza una adecuación del método científico propuesto por Mario Bunge[15]. Para la construcción del prototipo se sigue las actividades de la metodología de diseño mecatrónico [16].

1.5.1.Fase1: Planteamiento Del Problema

Para esta fase se utiliza la propuesta realizada por Apellido autor [17], que propone una incubadora automática de huevos de gallina asequible y controlada a distancia, capaz de alojar hasta 100 huevos y emulando las funcionalidades de las incubadoras comerciales. El proyecto involucró la selección de componentes, el uso de microcontroladores para el control, la implementación de lógica difusa y la monitorización remota a través de un servidor web. A continuación, se listan las principales actividades de esta fase.

Reconocimiento de los hechos: Clasificación y selección de los hechos.

Descubrimiento del problema: Hallazgo de un vacío o faltante. Estudio de los referentes teóricos del proyecto sobre los dispositivos tecnológicos que apoyen el proceso de producción avícola.

Formulación del problema: Planteamiento de una pregunta, reducción del problema a su núcleo significativo.

Producto: Planteamiento del problema y pregunta problema.

1.5.2.Fase2: Construcción Del Modelo Teórico

En esta fase se emplea la metodología de diseño mecatrónico [16], donde se expresan las directrices principales para desarrollar un producto con mejor sinergia en el dominio aplicación. Las actividades de esta fase se enumeran a continuación.

- ❖ Selección de los factores pertinentes: Estudio de los diferentes dispositivos tecnológicos que apoyen el proceso de producción avícola.

- ❖ Identificación de estrategias: Seleccionar e identificar las diferentes tecnologías que pueden ser aplicados en el dominio del problema.
- ❖ Desarrollo del prototipo propuesto.

Producto: Reporte con la caracterización de los diferentes dispositivos que apoyan el proceso de incubación y desarrollo del prototipo propuesto.

1.5.3.Fase3: Validación Del Dispositivo Propuesto

En esta fase se implementan algunas directrices reportadas en la metodología general de validación [18], que guían el desarrollo de la prueba de concepto.

- ❖ Búsqueda de soportes: Deducción de consecuencias particulares que pueden haber sido verificadas en proyectos similares.
- ❖ Planteamiento de predicciones o resultados esperados al realizar el dispositivo propuesto.
- ❖ Diseño y planeación del estudio de caso: planteamiento de los objetivos, hipótesis y medios para realizar el estudio de caso.
- ❖ Ejecución del estudio de caso: Validar el prototipo propuesto.

Producto: Reporte técnico con las consecuencias verificables, además, de las predicciones de resultados y reporte técnico de la prueba de concepto ejecutada.

1.5.4.Fase 4: Introducción De Las Conclusiones En La Teoría

- ❖ Confrontación de los resultados obtenidos con las predicciones.
- ❖ Reajustes al prototipo propuesto: Análisis de resultados y ajustes necesarios.

1.5.5.Fase 5: Documentación

- ❖ Escritura de artículos.
- ❖ Redacción del documento final de la tesis.

Producto: Documento final de trabajo de fin de grado y artículo científico.

Finalmente, en la figura 1 se exponen las etapas y actividades más importantes que se siguen en el proceso de investigación.

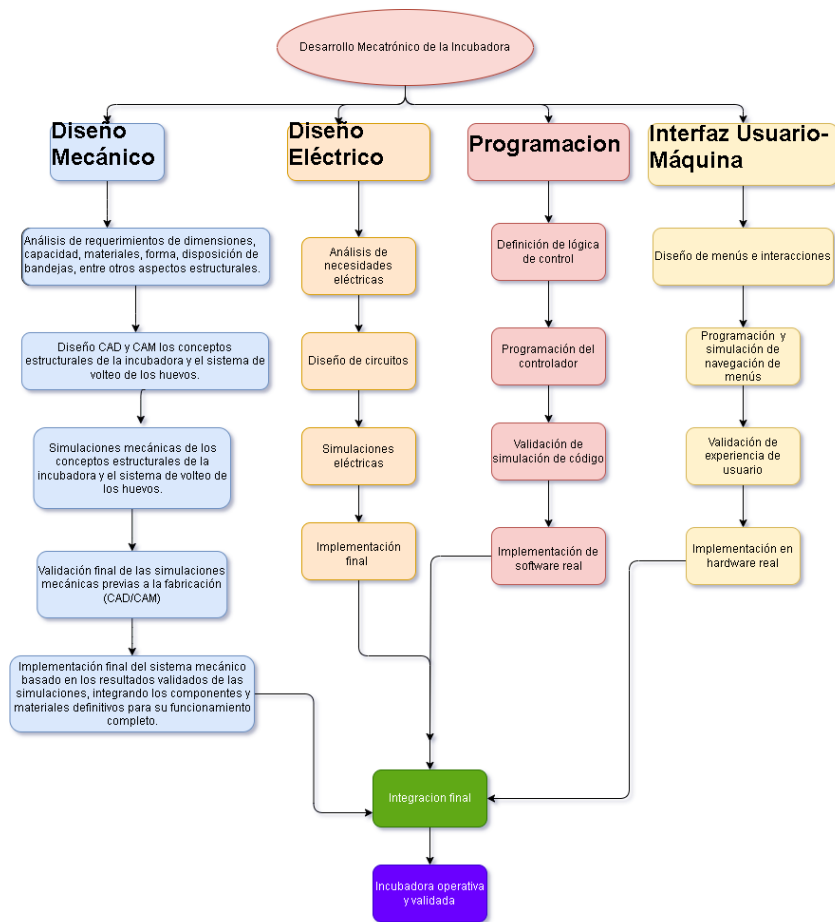


Figura 1. Etapas de la metodología
Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 2

2.1. Marco Teórico y Conceptual

2.1.1. Definiciones relacionadas con el proceso de incubación

2.1.1.1 Incubación Natural

El proceso de incubación natural es el método mediante el cual las aves incuban sus huevos para permitir que los embriones se desarrollen y eclosionen. Durante este proceso, las aves colocan sus huevos en un nido o área adecuada y los mantienen a una temperatura constante mediante el contacto directo de su cuerpo. Además, las aves giran periódicamente los huevos para garantizar un desarrollo uniforme de los embriones y los protegen de depredadores y condiciones ambientales adversas. Este proceso natural es crucial para el desarrollo exitoso de los embriones y la eclosión de los polluelos [19].

2.1.1.2 Etapas claves en el proceso de incubación

Durante las tres primeras etapas de incubación, que abarcan aproximadamente los primeros 14 días, se produce el desarrollo embrionario desde la fecundación inicial hasta la formación de órganos principales, seguido del crecimiento de plumas, esqueleto y extremidades. En las etapas posteriores, que van desde el día 15 hasta el día 21, el embrión experimenta un desarrollo más avanzado, incluyendo el crecimiento de órganos internos y la preparación para la eclosión, marcada por la rotura de la membrana del aire y la posición para salir del cascarón [20].

Comentado [JM2]: Sería interesante un gráfico/diseño mostrando las etapas

2.1.1.3 Incubación Artificial de Huevos

La incubación artificial de huevos de gallina es un proceso altamente tecnificado realizado en incubadoras equipadas con sistemas de control automatizados. Estas máquinas replican y optimizan de forma precisa las condiciones ideales de temperatura, humedad, ventilación y volteo que se dan durante la incubación natural. Gracias a sensores, microprocesadores y algoritmos predictivos que garantizan la

corrección inmediata de cualquier variación en los parámetros, maximizando a si las tasas de éxito en la eclosión de los polluelos.[21].

2.1.1.4 Humedad relativa

La humedad relativa en una incubadora de huevos se refiere a la proporción del vapor de agua presente en el aire en comparación con la cantidad máxima que podría contener a una temperatura específica[22]. Esta es un factor clave para una incubación exitosa, ya que tiene un impacto directo en el crecimiento del embrión y la eclosión de los huevos por lo que es vital mantener un nivel de humedad ideal, ya que esto afecta la cantidad de agua que los huevos pierden durante la incubación, lo que a su vez permite la correcta formación de la cámara de aire y un desarrollo saludable del embrión. Por lo tanto, es esencial controlar adecuadamente la humedad relativa para asegurar una alta tasa de eclosión y obtener pollitos de la mejor calidad [23].

2.1.1.5 Temperatura

La temperatura óptima para la incubación de huevos de gallina es generalmente de 37,5 grados Celsius, y mantener esta temperatura constante es vital para el desarrollo saludable del embrión. Cualquier variación en la temperatura puede tener efectos perjudiciales, como una tasa de eclosión baja o incluso la muerte del embrión. Durante la incubación, los huevos pierden agua, lo cual es necesario para la formación adecuada de la cámara de aire y el desarrollo del embrión. La temperatura de la incubadora influye en la velocidad a la que los huevos pierden agua y, por lo tanto, también en su peso. Por tanto, el control preciso de la temperatura durante la incubación es fundamental para lograr una alta tasa de eclosión y pollitos de calidad óptima [24].

Comentado [JM3]: °C...utilizar este formato

2.1.1.6 Volteo de huevos

El proceso de volteo de huevos en las incubadoras, que implica la rotación regular de los huevos durante el período de incubación, es esencial para asegurar un desarrollo embrionario saludable y una eclosión exitosa de los pollitos. Este proceso evita que el embrión se adhiera a la cáscara, lo cual podría obstaculizar su desarrollo al impedir el intercambio adecuado de gases y nutrientes con el exterior. Asimismo, el volteo facilita

Comentado [JM4]: Verificar si existe una palabra más técnica

la distribución uniforme del calor y la humedad alrededor del huevo, lo cual es crucial para un desarrollo embrionario uniforme y adecuado, además que un volteo regular también puede prevenir deformidades y fomentar el desarrollo muscular y óseo de los pollitos en crecimiento, por lo que se hace necesario voltear los huevos en las incubadoras para optimizar las condiciones de incubación y maximizar la tasa de eclosión de los huevos de gallina [25].

Dio formato: Resaltar

2.1.1.7 Ventilación forzada

La ventilación adecuada en el proceso de incubación de huevos es crucial para garantizar el suministro de oxígeno y eliminación de dióxido de carbono, mantener la temperatura y humedad óptimas para el desarrollo embrionario, y prevenir la acumulación de CO₂ tóxico dentro del huevo que pueda impactar negativamente la incubabilidad y calidad del pollito. Una correcta tasa de intercambio de aire a través de la ventilación de la incubadora es fundamental para respaldar la salud de los embriones y un proceso de incubación exitoso [26].

Dio formato: Resaltar

2.1.1.8 Eclosión de huevos.

La eclosión de huevos es el proceso mediante el cual un huevo fertilizado se desarrolla hasta dar origen a un organismo joven, como un polluelo en el caso de las aves. Durante la incubación, que varía según la especie, se establecen condiciones específicas de temperatura y humedad para favorecer el desarrollo del embrión, culminando con la rotura de la cáscara al finalizar el periodo de incubación. Este fenómeno biológico es fundamental en la reproducción de aves y otras especies que ponen huevos, implicando cambios fisiológicos y morfológicos en el embrión hasta la emergencia de un individuo capaz de sobrevivir fuera del huevo.[27].

2.1.2. Definiciones relacionadas con la tecnología

2.1.2.1 Controlador PID

Un controlador PID es un elemento crucial en una incubadora de huevos, ya que garantiza que la temperatura de incubación de los huevos se mantenga estable en el valor deseado de 37.5 °C. Este controlador se compone de tres elementos clave: la Acción Proporcional (P), la Acción Integral (I) y la Acción Derivativa (D), donde la

interacción de estos componentes permite que la potencia de calefacción se ajuste de manera continua para contrarrestar cualquier variación de la temperatura [28].

2.1.2.2 Control on off con histéresis

Un controlador ON-OFF con histéresis también puede ser utilizado en una incubadora de huevos para mantener la temperatura cercana al valor deseado de 37.5 °C. A diferencia del PID, este tipo de controlador opera de forma más simple: activa la calefacción cuando la temperatura baja de un umbral inferior y la desactiva al superar un umbral superior. La histéresis, es decir, el rango entre ambos umbrales permite reducir la frecuencia de encendido y apagado, evitando así el desgaste de los elementos calefactores y garantizando una temperatura suficientemente estable para el desarrollo embrionario [29].

2.1.2.3 Motor paso a paso

Un motor paso a paso es un tipo de motor eléctrico que convierte pulsos eléctricos en movimientos mecánicos discretos. Funciona mediante la activación secuencial de bobinas electromagnéticas alrededor de un rotor, lo que genera pasos incrementales de movimiento. Estos motores se utilizan en aplicaciones que requieren control preciso del movimiento, como impresoras 3D, máquinas CNC y sistemas de posicionamiento, debido a su capacidad para mantener una posición precisa sin necesidad de retroalimentación adicional [30].

2.1.2.4 Sensor De Temperatura

Los sensores de temperatura son dispositivos que miden la temperatura de un entorno o un objeto. Utilizan diferentes principios, como la resistencia eléctrica o la radiación infrarroja, para su funcionamiento. Se aplican en una variedad de campos, desde sistemas de climatización hasta procesos industriales, proporcionando mediciones precisas y confiables que son esenciales para el control de la temperatura en numerosos dispositivos y sistemas modernos [31].

2.1.2.5 Sensor de humedad

Un sensor de humedad es un dispositivo diseñado para medir el contenido de humedad en el aire o en un objeto. Estos sensores utilizan diferentes tecnologías para detectar la humedad, como capacitiva, resistiva o de absorción de agua. Se emplean en una variedad de aplicaciones, desde el control de la humedad en sistemas de climatización hasta la monitorización de la humedad en procesos industriales, agricultura, meteorología y aplicaciones domésticas. Proporcionan mediciones precisas y confiables que son fundamentales para regular la humedad en diversos entornos y mejorar la calidad de vida y la eficiencia en múltiples campos[31]

2.1.2.6 Sensor de CO2

Un sensor de CO2 es un dispositivo diseñado para medir los niveles de dióxido de carbono (CO2) en el aire. Estos sensores utilizan diferentes tecnologías, como infrarrojos no dispersivos (NDIR) o sensores electroquímicos, para detectar la concentración de CO2 en un entorno dado. Se utilizan en una variedad de aplicaciones, como sistemas de ventilación en edificios, control de calidad del aire en interiores, monitoreo de la calidad del aire en vehículos, control de procesos industriales y agricultura, entre otros [32].

2.2. Antecedentes

Al realizar una revisión literaria, se encontraron algunos trabajos que aportan al sector avícola con el estudio de diseño e implementación de incubadoras de huevos, como el trabajo [titulado "Construcción de una incubadora artificial de huevos" de desarrollado por Aldair Peña Arbeláez \[REF\]](#), el cual se enfoca en los sectores cercanos al corregimiento de la Aurora en Chiriguaná, Cesar, donde se evidencia una alta presencia de microempresarios dedicados a la cría de pollos. A pesar de la importancia de esta actividad para la dieta alimenticia, la falta de acceso a herramientas tecnológicas adecuadas y la escasez de suministro de polluelos en la región han llevado a la quiebra de muchos negocios en el sector. La construcción de una incubadora de huevos se presenta como una solución para mejorar las condiciones productivas de la comunidad, facilitar el acceso a tecnología de bajo costo y reducir los costos de producción. Los resultados de las pruebas de validación indican una

producción satisfactoria de polluelos, con una efectividad cercana al 90%. Este proyecto busca beneficiar a los microempresarios de la región, permitiendo la cría de 200 pollos bimestralmente y evitando la pérdida de huevos [33].

El documento presenta el desarrollo de una incubadora automática de huevos de aves de corral con capacidad de 100 huevos, monitoreo remoto y bajo costo. Destaca la importancia de la incubación artificial en la industria avícola y menciona los factores clave que influyen en el proceso, como la temperatura, humedad, ventilación y volteo de los huevos. Se describe el sistema de medición, el controlador difuso y sus componentes, así como la importancia de la lógica difusa en el control de procesos. Además, se menciona la relevancia de la tecnología mecatrónica en la construcción de la incubadora y se resalta la necesidad de mantener una temperatura estable para lograr una tasa de incubabilidad alta. El documento también destaca la implementación de sistemas de control como Arduino y la realización de pruebas de incubación para monitorear el desarrollo embrionario de los huevos abordando así la importancia de la tecnología en la mejora de la producción avícola y la preservación de especies en peligro [17].

En el estudio comparativo titulado: evaluación de dos tipos de incubadoras artesanales, sobre el porcentaje de nacimientos y peso al nacer en pollo de engorde se evaluó dos tipos de incubadoras artesanales, fabricadas con madera y duroport, respectivamente donde se midieron variables como el porcentaje de eclosión, el peso al nacer de los pollos y la tasa de mortalidad, encontrándose resultados similares entre ambos tipos de incubadoras dando como resultado un porcentaje de eclosión del 87% para las de madera y del 87.5% para las de duroport, mientras que el peso al nacer promedio fue de 39.6g y 40.4g respectivamente. La mortalidad fue del 13% en las incubadoras de madera y del 12.5% en las de duroport. Económicamente, se determinó que la incubadora de madera era más accesible, con menores costos de operación, aunque ambas incubadoras artesanales funcionaron de manera similar en términos productivos, se recomienda la utilización de la incubadora de madera debido a su mayor accesibilidad económica, especialmente para pequeños productores de traspatio [34].

El Trabajo Titulado: Automatización de una Incubadora Solar. Presenta un proyecto de automatización de una incubadora solar diseñada para pequeños productores. Se enfoca en crear incubadoras con controles electrónicos, de capacidad reducida y

Comentado [JM5]: Este es el mismo de la referencia 33? Si lo es, esta bien.
Sino debe cambiar la forma de introducir la referencia

Comentado [JM6]: Cual documento!

Comentado [JM7]: No colocar el título del trabajo...usar Apellido [REF]

modular para adaptarse a las necesidades de los usuarios. Se destacan los sistemas necesarios para el funcionamiento adecuado de la incubadora, como el de movimiento, aislamiento térmico, calentamiento de la cámara, eléctrico, respaldo energético y fotovoltaico. Se resalta la importancia de controlar parámetros como la temperatura, humedad relativa y posición de los huevos para garantizar un ambiente óptimo de incubación. Además, se menciona la eficiencia en la conversión de energía eléctrica a térmica para optimizar el proceso y reducir las pérdidas energéticas [14].

El proyecto titulado: **Development of a Solar Powered Poultry Egg Incubator for South West Nigeria** Kifilideen L. Osanyinpeju Agricultural and Bio-Resources Engineering Department, detalla el desarrollo de una incubadora de huevos de aves de corral con capacidad para 150 huevos, impulsada por energía solar en el suroeste de Nigeria, con el propósito de abordar los desafíos derivados del suministro eléctrico irregular que afecta a los incubadores comerciales en la región. Se subraya la importancia de la energía solar como fuente renovable para garantizar un suministro constante y eficiente durante el proceso de incubación. El sistema solar implementado comprende paneles solares, baterías, controladores de carga e inversores diseñados para mantener condiciones óptimas de temperatura y humedad en la incubadora, además de un análisis técnico detallado para su construcción. Se enfatiza la necesidad de realizar pruebas de rendimiento en los paneles solares para asegurar su fiabilidad en la entrega de la energía necesaria. Asimismo, se mencionan investigaciones previas sobre incubadoras de huevos que emplean diversas fuentes de energía, resaltando las ventajas de la energía solar en términos de disponibilidad, sostenibilidad y reducción de costos operativos. Se destaca la estabilidad del suministro eléctrico como un factor crucial para el éxito de la incubación de huevos, respaldando así el impacto positivo del proyecto en la producción avícola y la seguridad alimentaria regional [35].

Ver la posibilidad de ampliar un poco más esta sección, pues como está planteada la metodología se dice en la FASE 2 que el producto es: "Reporte con la caracterización de los diferentes dispositivos que apoyan el proceso de incubación y desarrollo del prototipo propuesto."

Dio formato: Resaltar

CAPITULO 3

Identificación de requerimientos funcionales y Modelamiento de los componentes estructurales

En este capítulo se presenta de manera integral todo el proceso realizado en cuanto al diseño estructural de la incubadora automatizada. El desarrollo abarca desde las etapas iniciales, como la realización de bocetos a mano alzada, hasta la implementación y validación del diseño final en su versión física.

El diseño estructural incluyó simulaciones detalladas de diversos sistemas clave utilizando el programa Flow Simulation[36], con el objetivo de analizar y optimizar aspectos como el flujo de aire dentro del sistema. Estas simulaciones resultaron fundamentales para garantizar condiciones óptimas de incubación, minimizando riesgos como malformaciones en los polluelos o tasas de mortalidad elevadas.

Además, se llevaron a cabo cálculos matemáticos pertinentes para la selección de materiales y componentes. Se eligieron materiales como placas de poliestireno expandido y Thermolon[37], un esqueleto estructural de ángulo metálico de 1 pulgada y madera MDF tratada con esmalte para mayor durabilidad. El sistema de volteo de huevos se diseñó con tubos cuadrados de 1 pulgada, garantizando robustez y versatilidad, mientras que las bandejas se fabricaron con ángulos de aluminio y acrílico junto con malla plástica para el soportar de cada huevo.

El proyecto también incluyó el uso de software especializado CAD, como SolidWorks[38], para simular el ensamblaje virtual de las piezas del sistema antes de su producción. Esto permitió detectar posibles problemas en el diseño, realizar ajustes y validar el rendimiento del sistema antes de su construcción física.

3.1. Bocetos a Mano Alzada

El diseño de la incubadora comenzó con bocetos a mano alzada para visualizar la estructura general y planificar la distribución de componentes críticos, como los ventiladores, el humidificador y las bandejas de huevo, tal como se muestra en la Figura 2. En esta etapa, se consideraron factores esenciales, como el flujo de aire, necesario para mantener una temperatura y humedad uniformes dentro de la incubadora[39]. Los bocetos iniciales facilitaron la evaluación de los ventiladores y su ubicación estratégica, así como el delineado de las dimensiones totales de la incubadora (80 x 60 x 120 cm, Figura 3), espacio diseñado para alojar bandejas comerciales con capacidad para hasta 340 huevos. Además, los bocetos ayudaron a planificar el acceso a las bandejas y la geometría interna, logrando un diseño ajustado a los requerimientos en términos de control de parámetros y capacidad de incubación.

[Falta el diseño 1](#)

[Indicar sobre el boceto cuales son las bandejas, los ventiladores, y demás elementos para una mejor descripción](#)

[Mejorar la figura 3, que sea una hoja blanca.](#)

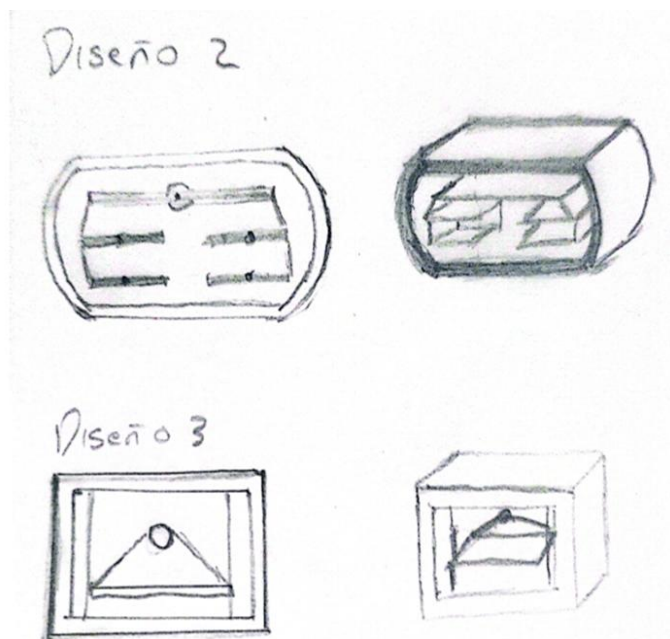


Figura 2. Bocetos a mano alzada que muestran la distribución de los ventiladores y la estructura general de la incubadora.
Fuente: Elaboración propia.

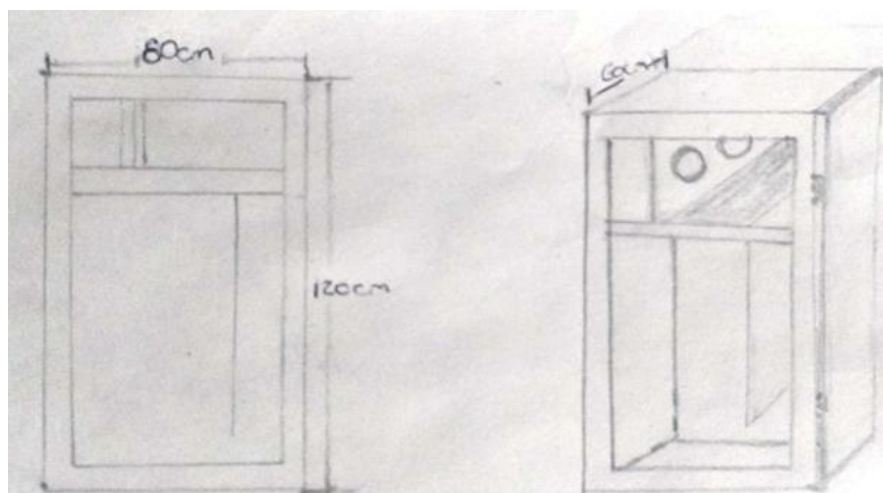


Figura 3. Boceto final seleccionado del diseño de la incubadora.
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Modelado CAD y Simulación

En esta sección se llevaron a cabo simulaciones computacionales para evaluar el comportamiento del flujo de aire dentro de la incubadora, garantizando una distribución homogénea de temperatura y humedad, factores críticos para la viabilidad embrionaria. Además, se realizó un análisis estructural de las bandejas mediante un estudio de elementos finitos (FEA) en SolidWorks Simulation [40], con el objetivo de determinar su resistencia mecánica, distribución de esfuerzos y deformaciones bajo carga estática. Estos análisis permiten validar el diseño en términos de durabilidad y eficiencia estructural, asegurando un funcionamiento óptimo del sistema.

3.2.1. Comportamiento del flujo

El software SolidWorks fue fundamental para el diseño de la incubadora, ya que permitió crear un modelo 3D detallado a partir de los bocetos iniciales y visualizar el diseño en detalle. Con la extensión SolidWorks Flow Simulation, se analizó la distribución del flujo de aire, incluyendo condiciones de contorno como temperatura del aire la cual se estableció en 37.5°C , humedad relativa en 55%, caudal flujo de los ventiladores de $132\text{ m}^3/\text{h}$ por hora cada uno y presión atmosférica del aire en las entradas y salidas de 101325 Pa [41] (ver figura 3). Esta simulación reveló áreas críticas con un flujo insuficiente, lo que llevó a reconfigurar la disposición de los ventiladores y ajustar la geometría interna. Cada iteración de simulación ayudó a perfeccionar el diseño, logrando una distribución más eficiente del flujo de aire dentro de la incubadora.

Comentado [JM8]: La figura 3 no muestra esto

Comentado [JM9]: Describir mejor la figura, indicando entrada/salida de aire, los lugares (arriba abajo izquierdo derecho) adecuados/no adecuados y valores

Comentado [JM10]: Mejorar la figura, pues está cortada

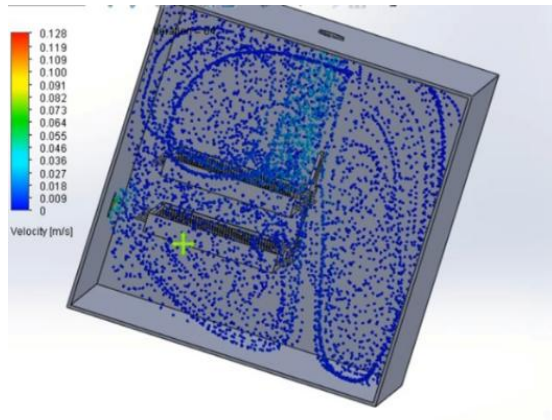


Figura 4. Primer boceto con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.
Fuente: Elaboración propia.

El diseño mostrado en la figura 4 presenta una incubadora rectangular equipada con dos bandejas para huevos, un ventilador en la parte superior y una salida de aire en la parte inferior. La circulación del flujo de aire dentro del sistema evidenció problemas significativos en su distribución, lo que afectó negativamente el rendimiento global del diseño. Se detectó una concentración excesiva de aire en la bandeja de huevos debido a la orientación directa del ventilador hacia ellas; con un flujo de 132 m³/h, esto generaba un exceso de ventilación perjudicial, ya que introducía aire más frío y seco que podría deshidratar los huevos, especialmente en altitudes elevadas, dificultando así el mantenimiento de los puntos de ajuste de temperatura y humedad en las incubadoras[41]. Como consecuencia, se concluyó que el ventilador no debe estar orientado directamente hacia los huevos para evitar estos efectos adversos.

Comentado [JM11]: ¿Donde?

Comentado [JM12]: Falta coherencia en esta frase

Comentado [JM13]: En todas las figuras colocar la escala de forma adecuada sin cubrir la simulación y con al escala completa

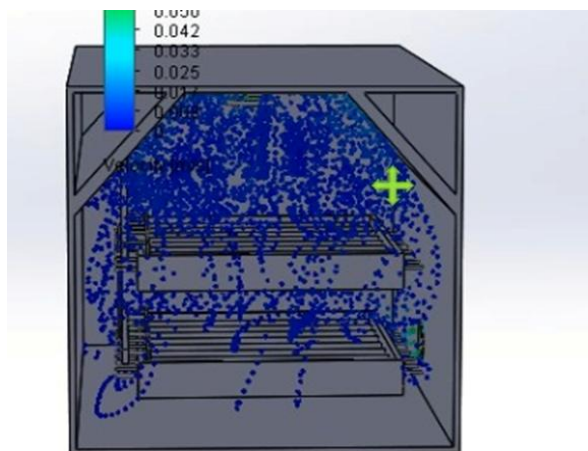


Figura 5. Segundo boceto con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.

Fuente: Elaboración propia.

El diseño mostrado en la figura 5 presenta una incubadora rectangular con dos paredes inclinadas que ayudan a redirigir mejor el aire hacia las bandejas de huevos, además de un ventilador orientado hacia arriba con un caudal de 132 m³/h. Esta posición del ventilador tiene como objetivo mejorar la circulación del aire permitiendo que el aire caliente suba y se distribuya de forma más uniforme dentro de la incubadora. En la simulación del flujo de aire se evidenció una mejora notable en comparación con versiones anteriores, ya que gracias a la nueva orientación del ventilador y a las paredes inclinadas se logró una mezcla mucho más homogénea del aire. Esto trajo varios beneficios: por un lado, se evitó la formación de zonas muertas o de estancamiento, generando un ambiente térmico más parejo; por otro, al no dirigir el aire directamente sobre los huevos, se redujo el riesgo de deshidratación o daños en los embriones. En general, este diseño se acerca más a las condiciones ideales para una incubación eficiente, ya que garantiza un entorno más estable y controlado. A pesar de estas mejoras, se decidió seguir optimizando el sistema, evaluando posibles ajustes en la ubicación de los componentes internos y en el tamaño del ventilador para seguir aumentando la eficiencia.

Comentado [JM14]: No se aprecia el ventilador

Comentado [JM15]: distribución

Comentado [JM16]: Pero casi no hay flujo en el bandeja de abajo

Dio formato: Resaltar

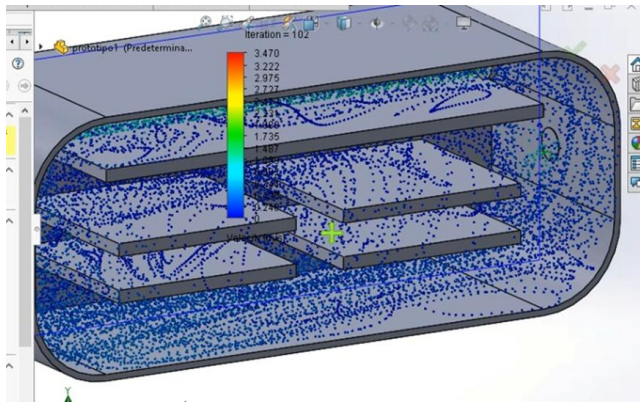


Figura 6. Tercer boceto con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.
Fuente: Elaboración propia.

Este diseño mostrado en la figura 6 presenta una incubadora con forma ovalada que cuenta con estantes internos para la colocación de los huevos, un ventilador de 132 m³/h ubicado en la parte superior del estante para favorecer la recirculación del aire, y un orificio de oxigenación en el lado derecho. La simulación se llevó a cabo bajo condiciones de incubación estables, con una temperatura de 37.7°C y una humedad del 75%. Los resultados revelaron que el flujo de aire es menos turbulento en la parte inferior, mientras que en la zona de las bandejas se presenta mayor turbulencia. Esta diferencia en la dinámica del aire genera una distribución desigual de las condiciones internas, lo que no garantiza un ambiente uniforme para todos los huevos. Como consecuencia, podrían aparecer zonas con temperaturas o niveles de humedad diferentes, afectando el desarrollo parejo de los embriones y comprometiendo la eficiencia del proceso de incubación.

Comentado [JM17]: No se aprecia

Comentado [JM18]: No creo que sea la palabra mas adecuada, por que no inyectan oxigeno o sí?

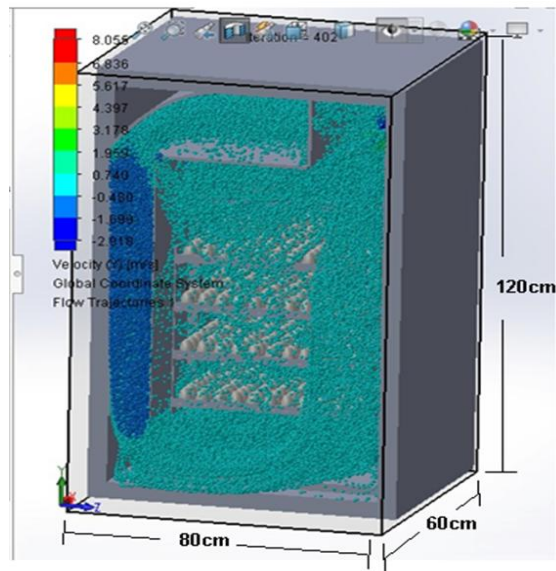


Figura 7. Boceto Final con análisis de flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, después de varias pruebas iterativas se alcanzó el diseño definitivo de la incubadora (Ver figura XX), que incluye ventiladores en la parte superior, cada uno con un caudal de 132 m³/h. Estos ventiladores dirigen el aire hacia un canal en media luna que ayuda a redirigir el aire a la parte inferior favoreciendo así la circulación del aire. Dado que el aire a 38 grados es menos denso, tiende a elevarse; cuando es forzado por los ventiladores hacia abajo, sube y pasa los huevos, logrando una distribución más homogénea de calor y humedad[42]. Este diseño fue elegido por su capacidad para mantener condiciones óptimas para el desarrollo de los embriones, asegurando que todos los huevos reciban una temperatura uniforme y adecuada, lo cual es crucial para su incubación exitosa. Además, se incorporaron dos orificios: dos en la parte trasera de cada ventilador para la oxigenación y otro en la parte inferior, que permite la salida de aire para renovar el oxígeno necesario para los huevos. La simulación mostró una baja velocidad de flujo, lo que es beneficioso para el desarrollo de los embriones, ya que evita la deshidratación y daños físicos. Este enfoque asegura un entorno controlado y estable, maximizando la eficiencia del proceso de incubación.

Comentado [JM19]: En todas la figuras, sería interesante ver el CAD desde diferentes ángulos para evidenciar la posición de los elementos internos y al lado la simulación

Comentado [JM20]: No se ve!

Comentado [JM21]: Esto debería ir mas arriba en la descripción y después concluir

3.2.2. Análisis Estático

En esta investigación se realizó un análisis de la resistencia mecánica y la deformación de una lámina de polimetilmetacrilato de 3 mm de espesor, perforada con 36 cavidades diseñadas para alojar huevos de aproximadamente 70 g cada uno. Para evaluar el comportamiento estructural del material bajo carga, se emplea el criterio de Von Mises [43], complementado con el análisis del desplazamiento total y el factor de seguridad. En la Tabla 1 se presentan las dimensiones específicas de la bandeja de polimetilmetacrilato, mientras que en la Tabla 2 se detallan las propiedades mecánicas del material, incluyendo la resistencia última a la tracción y el módulo de Young, parámetros fundamentales para la validación del diseño y la evaluación de su desempeño estructural.

Comentado [JM22]: No comprendo esta referencia!

Tabla 1. Dimensiones del material Polimetilmetacrilato

Dimensiones de la bandeja	
Material	Polimetilmetacrilato (Acrílico)
Espesor	3 mm
Dimensiones	470 mm X 450mm
Diámetro de perforaciones	45 mm
Cantidad de perforaciones	36
Distancia entre centros de perforaciones:	69 mm
Distancia mínima entre perforaciones	24 mm

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas del polimetilmetacrilato (acrílico)

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Módulo de Young	E	3200	MPa
Resistencia última a la tracción	σ_u	70	MPa
Resistencia a la compresión	σ_c	110	MPa
Resistencia a la flexión	σ_f	100	MPa

Resistencia al impacto (Izod)	al	2.0-3.2	kJ/m ²
Coeficiente de Poisson	v	0.35	-
Densidad	ρ	1.18	g/cm ³
Esfuerzo de fluencia	σ _y	65	MPa
Coeficiente de expansión térmica	α	70-77	μm/m·°C
Conductividad térmica	k	0.19	W/m·K
Temperatura de transición vítrea	T _g	105-110	°C
Índice de refracción	n	1.49	-

3.2.2.1 Carga aplicada

El análisis estructural considera la carga generada por el peso de los huevos distribuidos sobre la lámina de polimetilmetacrilato perforada. Cada huevo tiene un peso promedio de 70 g, lo que equivale a una fuerza gravitacional dada por la ecuación 1:

$$F = m * g \quad (1)$$

donde:

- m es la masa del huevo en kg,
- g es la aceleración gravitacional en m/s².

Sustituyendo los valores en la ecuación 2:

$$F = 0,07kg * 9,8\frac{m}{s^2} = 0,6867N \quad (2)$$

Dado que la bandeja está diseñada para alojar 36 huevos, la carga total aplicada sobre la estructura se muestra en la ecuación 3:

$$F_{total} = 36 * 0,6867N = 24.72N \quad (3)$$

3.2.2.2 Simulación y resultado

El análisis estructural se realizó mediante un estudio de elementos finitos en SolidWorks Simulation, bajo condiciones de carga estática y restricciones en los bordes de la placa.

- **Esfuerzo de Von mises**

En esta sección se analiza el esfuerzo de Von Mises obtenido en la simulación, el cual permite evaluar si el material se encuentra dentro del límite de resistencia permisible. El esfuerzo máximo registrado en la simulación fue 1.484 MPa, localizado principalmente en los bordes de las perforaciones, debido a la concentración de esfuerzos en estas zonas. La Figura 8 muestra la distribución de esfuerzos en la estructura.

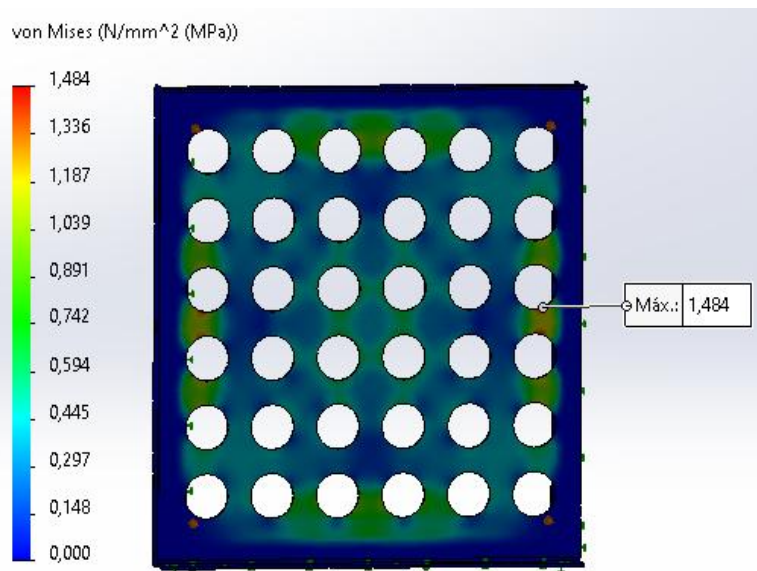


Figura 8. Simulación en solidword Simulation de la tensión de Von Mises
Fuente: Elaboración propia

- **Desplazamiento Total (Desplazamiento URES)**

El desplazamiento total registrado en la simulación alcanzó un valor máximo de 1.18 mm, situándose en el centro de la placa debido a la flexión generada por la carga aplicada. La Figura 9 presenta la distribución del desplazamiento en la bandeja, evidenciando que los mayores desplazamientos se concentran en las zonas sin perforaciones.

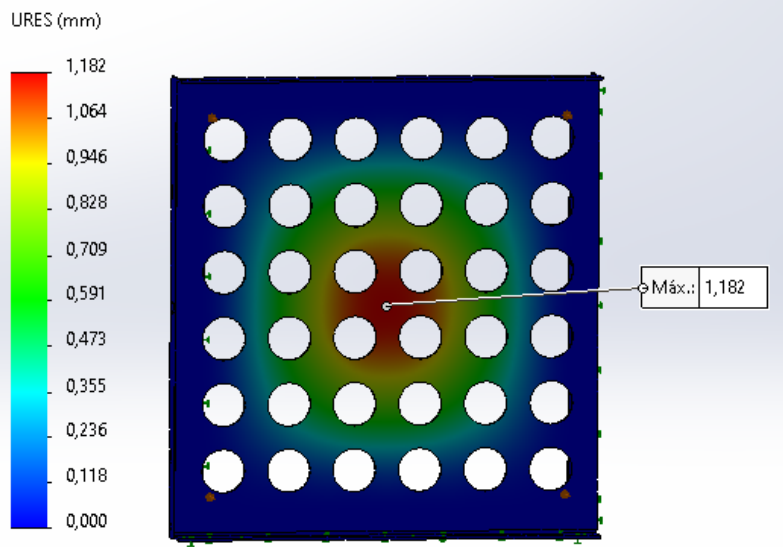


Figura 9. Simulación de solidword Simulation del desplazamiento total
Fuente: Elaboración propia

- **Factor de seguridad**

El factor de seguridad se obtiene a partir de la relación entre la resistencia última del material y el esfuerzo máximo aplicado en la simulación, ver ecuación 4:

$$FS = \frac{\sigma_{permitida}}{\sigma_{maxima\ aplicada}} \quad (4)$$

Donde:

- es el límite de fluencia o resistencia última del material (70 MPa para el acrílico).
- es el máximo esfuerzo registrado en la simulación (1.484 MPa).

Comentado [JM23]: ¿?

Comentado [JM24]: Esto no es lo mismo!

Aplicando los valores, se obtuvo que (ver ecuación 5):

$$FS = \frac{70MPa}{1.484MPa} \approx 47 \quad (5)$$

Dado que en la simulación el factor mínimo registrado fue un valor de 30, se concluye que la estructura está ampliamente sobredimensionada y no presenta riesgo de fallo estructural. La Figura 10 ilustra la distribución del factor de seguridad en la estructura.

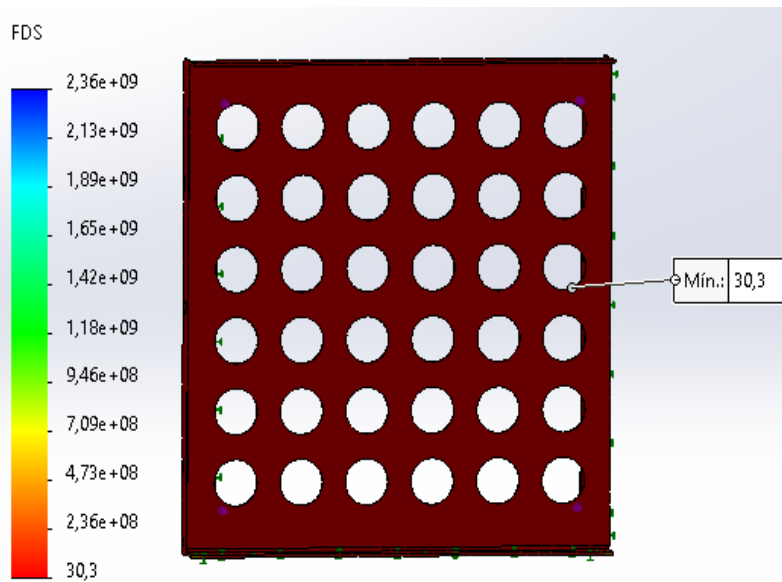


Figura 10. Simulación en solidword Simulation del factor de seguridad
Fuente: Elaboración propia

3.2.2.3 Análisis de los datos de la simulación

- Los resultados indican que la placa de acrílico cumple con los criterios de seguridad estructural bajo la carga aplicada. El esfuerzo máximo de Von Mises (1.484 MPa) es significativamente menor que el límite de fluencia del material (70 MPa), garantizando la integridad estructural.
- El desplazamiento máximo de 1.1mm se encuentra dentro de los límites aceptables para la estabilidad del sistema.
- El factor de seguridad mínimo de 30 sugiere que el diseño está sobredimensionado, lo que abre la posibilidad de optimización en términos de reducción de material.

Dio formato: Resaltar

3.3. Diseño CAD del sistema

Se utilizó el software especializado SolidWorks para realizar el diseño conceptual del sistema de incubación automatizado. Este software permitió modelar de manera detallada las piezas necesarias para la construcción del sistema, garantizando precisión y coherencia en el ensamblaje.

3.3.1. Diseño de la puerta

Resumir un poco la sección, evitar las subsecciones, indicar desde un inicio que es tipo sándwich (mostrar la vista explosionada) y después ya ir mostrando las secciones. Es mas las figuras se podrían colocar en una sola y denominarlas de (a), (b) (c) (d)...

Se diseñó la puerta que permite el acceso al interior y exterior de la incubadora. Esta puerta tiene dimensiones de 120 cm de altura por 80 cm de ancho, garantizando un acceso adecuado para inspecciones y mantenimiento. Además, cuenta con un visor de 50 cm x 50 cm, diseñado específicamente para observar el proceso de incubación sin necesidad de abrir la puerta. Este visor proporciona una visualización suficiente del interior para una supervisión en condiciones normales de incubación como se ilustra en la figura 11.

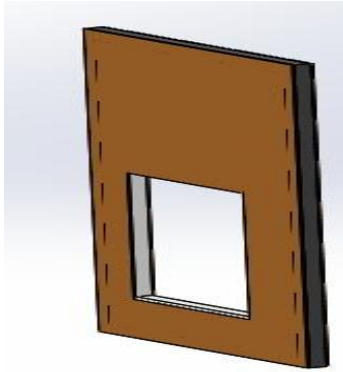


Figura 11. Diseño CAD de la puerta del sistema de incubación
Fuente: Elaboración propia

Construida en forma rectangular, diseñada para brindar soporte y rigidez a la puerta de la incubadora. Garantiza su durabilidad y correcta alineación con el marco del sistema. Cuenta con dimensiones de 81 cm de ancho y 120 cm de largo y armada con tubo de hierro cuadrado de 1 pulgada, como se muestra en la Figura 12.

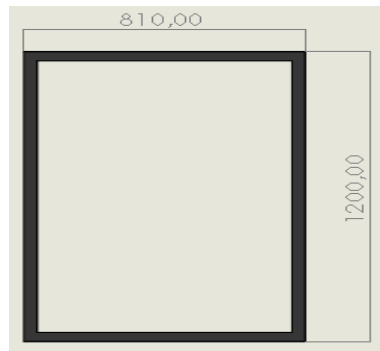


Figura 12. Diseño CAD Marco de hierro reforzado para el soporte de la puerta de la incubadora.
Fuente: Elaboración propia.

Están compuestas por dos láminas de madera de 3 mm y 5 mm de grosor, como se muestra en la figura 13, diseñadas para encapsular la lámina de poliestireno expandido. Estas conforman las caras frontal y trasera de la puerta, proporcionando una estructura robusta, estable y con un acabado estéticamente agradable.

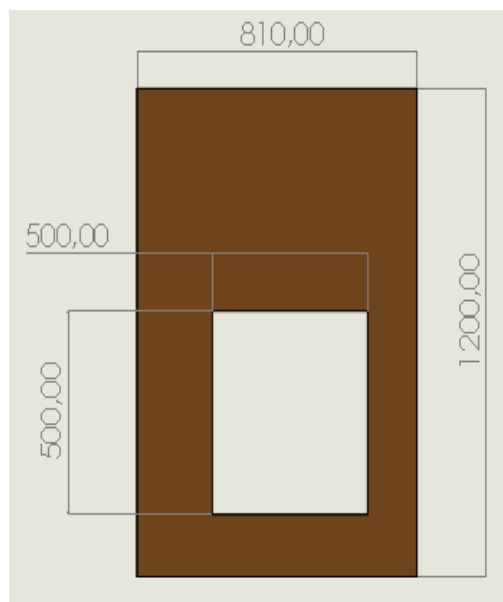


Figura 13. Diseño CAD de láminas de MDF configuradas para soportar y reforzar de manera eficiente la estructura de la puerta de la incubadora
Fuente: Elaboración propia

Se incorporó una lámina de poliestireno expandido[43] de 3 cm de grosor entre las capas de madera, como se muestra en la figura 14, para proporcionar un aislamiento térmico eficiente. Este material reduce significativamente la pérdida de calor y contribuye a mantener condiciones óptimas dentro del sistema de incubación, asegurando una temperatura estable y adecuada para el desarrollo de los embriones.[44].

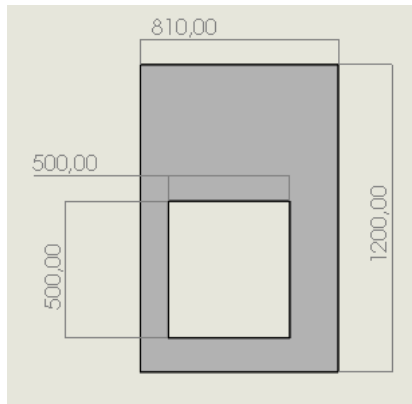


Figura 14. Diseño CAD de láminas de poliestireno expandido para el aislamiento térmico de la puerta de la incubadora
Fuente: Elaboración propia

Para la implementación del visor de la incubadora, se utilizaron dos láminas de polimetilmetacrilato, cada una con dimensiones de 55x55 cm, las cuales se acoplan a la puerta de la incubadora dejando un espacio de aire de 3 cm entre ambas como se muestra en la figura 15. Este diseño mejora la visibilidad interna y contribuye al aislamiento térmico al mismo tiempo.

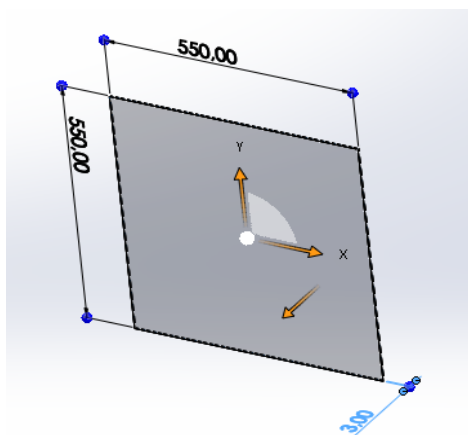


Figura 15. Diseño CAD de los visores del interior de la incubadora.
Fuente: Elaboración propia

Este diseño tipo sándwich garantiza una alta eficiencia térmica y un mantenimiento óptimo de las condiciones internas, aspectos fundamentales para el éxito del proceso de incubación. La Figura 16 muestra de manera detallada la estructura, los materiales empleados y su distribución en la puerta, destacando cómo cada componente se integra para mejorar el desempeño general del sistema.

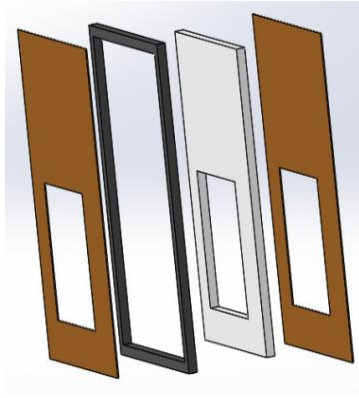


Figura 16. *Diseño CAD vista explosión de la puerta del sistema de incubación*
Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Soporte para la resistencia eléctrica.

Para la fabricación del soporte calefactor, se optó por el uso de polimetilmetacrilato como materia prima debido a su ligereza, facilidad de manipulación y resistencia al calor dentro de la incubadora [45]. Su estructura incluye muescas estratégicamente distribuidas que permiten colocar la resistencia de silicona en un patrón de zigzag, como se aprecia en la figura 17, optimizando la distribución uniforme del calor. Además, el soporte está posicionado estratégicamente frente a los ventiladores, lo que mejora la circulación del aire caliente y garantiza una temperatura homogénea en el interior de la incubadora.

Las dimensiones del soporte son de 54 cm de ancho por 23 cm de alto, dimensiones diseñadas para ajustarse perfectamente al espacio disponible en el sistema ilustrado en la figura 18. El polimetilmetacrilato utilizado fue sometido a pruebas de resistencia térmica y mecánica para asegurar su durabilidad y su capacidad de soportar las condiciones del entorno operativo.

Comentado [JM25]: ¿?

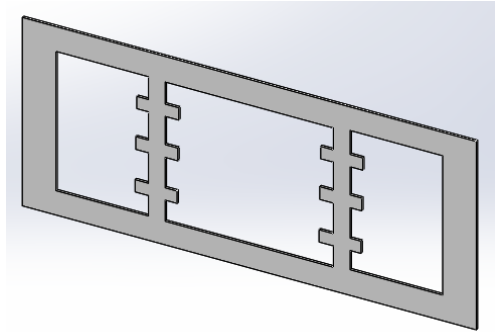


Figura 17. Diseño en vista isométrica del soporte de la resistencia
Fuente: Elaboración propia

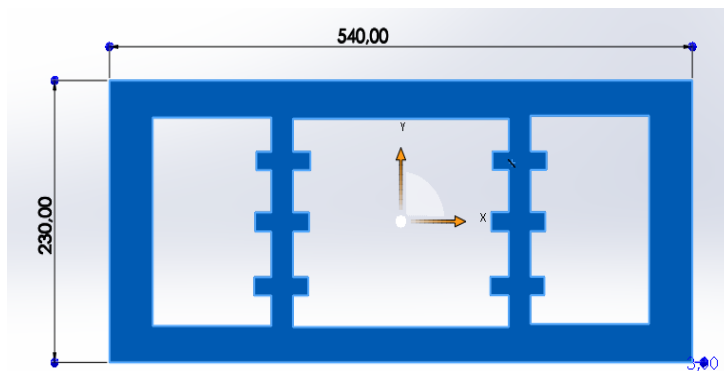


Figura 18. Medias conceptuales del soporte de la resistencia dadas en milímetros
Fuente: Elaboración propia

Comentado [JM26]: ¿?

3.3.3. Sistema de ventilación

Para garantizar una distribución uniforme del flujo de aire en el interior de la incubadora, se diseñó un sistema optimizado que asegura una circulación homogénea en todo el espacio. Este diseño se analizó mediante el software SolidWorks Flow Simulation como se muestra en la figura 6, el cual permitió simular el comportamiento del flujo de aire, tal como se mostró en los resultados de simulación presentados anteriormente. A partir de estos análisis, se determinaron las dimensiones precisas de cada componente que forma parte del sistema de ventilación, incluyendo el soporte de ventiladores, la media luna y el canal de aire.

3.3.3.1 Soporte de ventiladores

Para el soporte de los ventiladores, este se diseñó inicialmente en SolidWorks con las dimensiones mostradas en la figura 19. Este soporte, con forma de "L", permite acoplar los dos ventiladores axiales y sirve como base para los demás componentes dentro de la incubadora, como el soporte de la resistencia eléctrica y la cubeta del humidificador. Su diseño no solo facilita la integración de los elementos, sino que también contribuye a la estabilidad estructural del sistema, asegurando un funcionamiento eficiente y seguro.

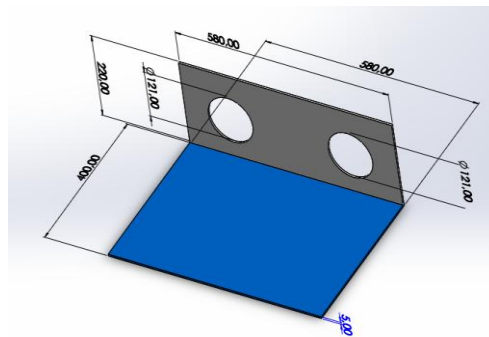


Figura 19. Ensamble del soporte para los ventiladores
Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2 Media luna

Con el objetivo de optimizar la circulación del aire dentro de la incubadora, se incorporó una curvatura tipo media luna, tal como se muestra en la figura 20 para dirigir de manera más eficiente el flujo de aire proveniente de los ventiladores. Este diseño permite que el aire se redirija hacia el canal de aire sin encontrar resistencia significativa. Sin este componente, el aire que llega a la parte inferior del canal disminuiría considerablemente, ya que el flujo expulsado por los ventiladores chocaría con la pared de la incubadora en un ángulo de 90 grados, obstaculizando su paso hacia el canal de aire. La media luna, por tanto, optimiza la circulación del aire y asegura un flujo continuo y homogéneo en el interior de la incubadora.

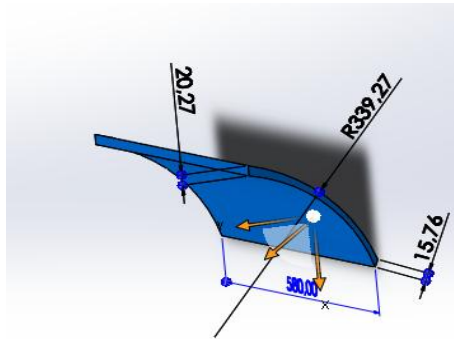


Figura 20. Curva para el sistema de ventilación
Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 Canal de Aire

Con el propósito de garantizar una distribución eficiente del aire caliente, se diseñó un canal de aire en forma de 'L', como se muestra en la Figura 21, el cual se acopla a la pared de la incubadora para formar un conducto rectangular que guía el flujo de aire desde los ventiladores hasta la parte inferior del sistema. Este diseño permite una distribución uniforme del aire caliente en el espacio donde se incuban los huevos, asegurando que la salida de aire al final del canal sea continua y homogénea. De esta manera, se optimiza la estabilidad térmica dentro de la incubadora, reduciendo diferencias de temperatura y mejorando el desarrollo embrionario.

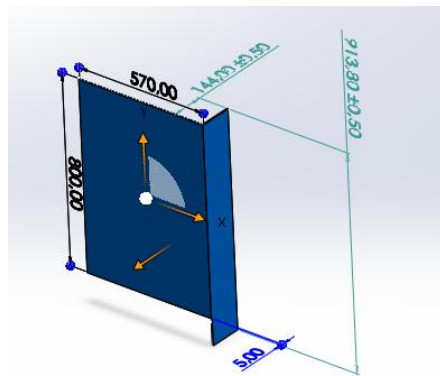


Figura 21. Canal de distribución para el sistema de ventilación
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 22 se puede observar la integración de los componentes previamente descritos, los cuales conforman el sistema de distribución de aire. Este diseño optimiza la circulación del flujo térmico dentro de la incubadora, garantizando una distribución uniforme del calor y mejorando las condiciones necesarias para el proceso de incubación.



Figura 22. Sistema para el flujo del aire dentro de la incubadora
Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.4 Sistema de oxigenación

Con el fin de asegurar una adecuada renovación del aire en el interior de la incubadora, se diseñó un sistema de oxigenación compuesto por dos orificios de entrada ubicados en la parte superior, estratégicamente posicionados detrás de cada ventilador axial. Esto permite que los ventiladores impulsen aire fresco desde el exterior hacia el interior de la incubadora. Además, se incluyó un orificio de expulsión en la parte inferior, facilitando la salida del aire viciado y asegurando una renovación continua como se muestra en la figura 23.

Este sistema es esencial para el desarrollo de los huevos, ya que garantiza un suministro constante de oxígeno y la eliminación eficiente del dióxido de carbono (CO_2) producido por los embriones. Además, contribuye a mantener una temperatura y humedad uniformes dentro de la incubadora, evitando la acumulación de gases

Comentado [JM27]: Para garantizar una adecuada renovación del aire en el interior de la incubadora, se diseñó un sistema de ventilación

Esto ya que oxigenación puede ser malinterpretado como la inyección de oxígeno al sistema!

nocivos que podrían afectar la tasa de eclosión y el desarrollo saludable de los embriones.

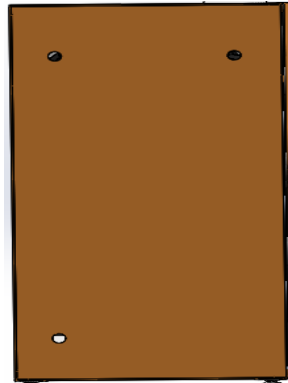


Figura 23. Orificios de oxigenación del sistema
Fuente: Elaboración propia

3.3.4. Caja de control

Para el diseño de la caja de control, se adoptó un enfoque estructurado que permite alojar de manera organizada todos los componentes esenciales para el control y la alimentación del sistema. Las dimensiones conceptuales de la caja se detallan en la figura 24.

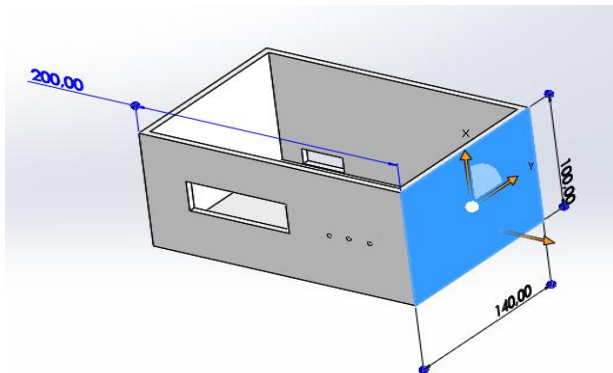


Figura 24. Medidas conceptuales de la caja de control
Fuente: Elaboración propia

En su interior, se integran elementos clave, como la pantalla para la visualización de datos, el sistema de alimentación, un ventilador para la disipación de calor, la placa de control y el cableado correspondiente como se puede observar en la figura 25. La distribución estratégica de estos componentes no solo optimiza el espacio, sino que también facilita el mantenimiento, mejora la disipación térmica y garantiza un funcionamiento más eficiente y seguro del sistema.



Figura 25. Componentes integrados en la caja
Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Diseño del sistema de volteo de los huevos

Para el diseño de volteo de huevos, se consideró el aprovechamiento máximo del área útil, con el objetivo de optimizar el espacio disponible y maximizar la capacidad de almacenamiento de huevos por ciclo de incubación. Para ello, se tomaron como referencia bandejas comerciales existentes, cuya disposición y geometría fueron analizadas para garantizar una distribución eficiente y una adecuada ventilación dentro del sistema de incubación. En la Figura 26 se ilustra un modelo de bandeja comercial con una capacidad aproximada de 88 huevos, utilizado como base para el desarrollo del presente diseño.

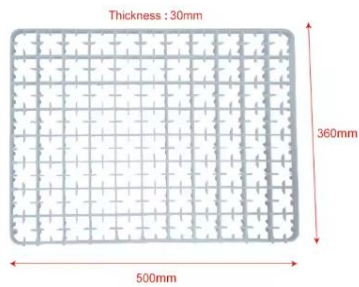


Figura 26. Bandeja comercial
Fuente:[46]

El soporte principal de las bandejas fue diseñado en SolidWorks con las dimensiones especificadas en la Figura 27. Su función estructural es garantizar la estabilidad de las cuatro bandejas, proporcionando un soporte firme y un adecuado apoyo en la base de la incubadora. Esto evita movimientos indeseados durante el volteo, asegurando un sistema seguro y eficiente.

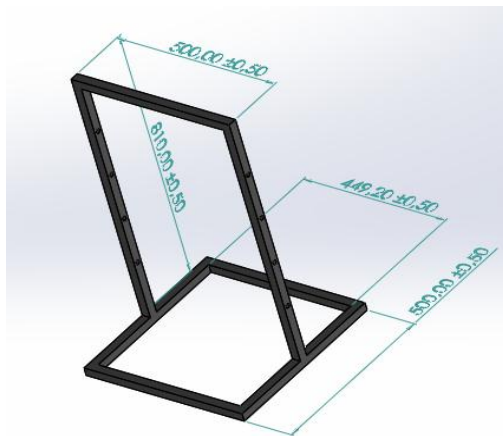


Figura 27. Medidas del Soporte principal del sistema de volteo
Fuente: Elaboración propia

Las camas de las bandejas se acoplan al soporte mediante cuatro estructuras idénticas, diseñadas con dimensiones específicas, como se muestra en la Figura 28.

Estas camas permiten que las bandejas comerciales encajen de manera precisa, asegurando estabilidad y un correcto funcionamiento del sistema de volteo.

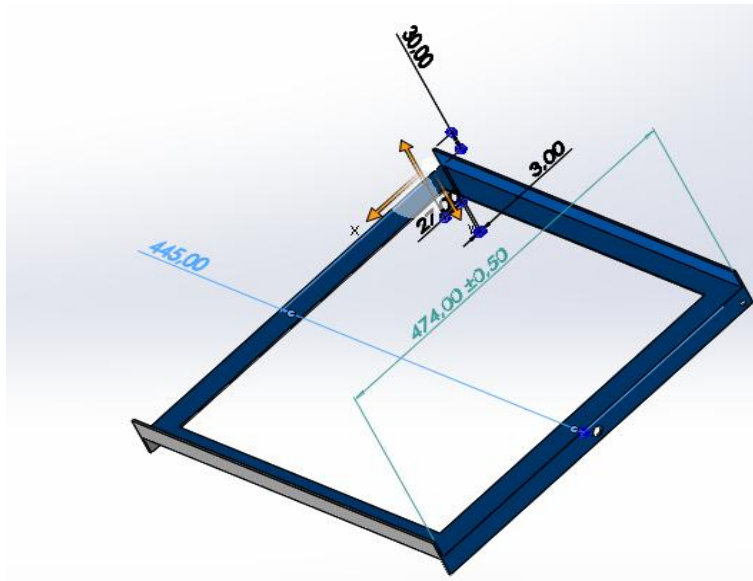


Figura 28. Base donde van a ir sujetas las bandejas
Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista económico, las bandejas comerciales tienen un costo elevado, y fabricarlas desde cero resultaría aún más costoso, especialmente debido a la limitada disponibilidad de tecnología para trabajar con plásticos. Por esta razón, se optó por diseñar bandejas con capacidad para 36 huevos cada una. Durante este proceso, se modelaron las bandejas y se distribuyeron los espacios para cada huevo en SolidWorks, como se muestra en la Figura 29.

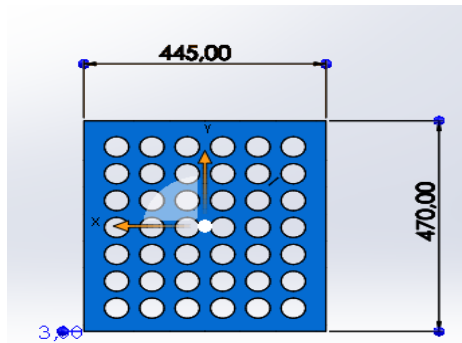


Figura 29. Medida y diseño conceptual de las bandejas

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de obtener una adecuada transmisión del movimiento y asegurar que los 4 niveles de bandejas se coordinen y mantengan el mismo ángulo de inclinación, se diseñaron dos piezas de aluminio para brindar la estabilidad y garantizar el ángulo correcto en el sistema. Estas piezas, cuyas medidas son de 15 mm de ancho por 46 cm de largo, se muestran en la figura 30. Además, cuentan con cuatro orificios de 7 mm de diámetro, con una distancia de 15 cm entre cada uno de ellos, lo que coincide con la separación entre las bandejas en posición horizontal. Esto mejora y complementa la estabilidad del sistema, asegurando un volteo uniforme y preciso en todos los niveles.

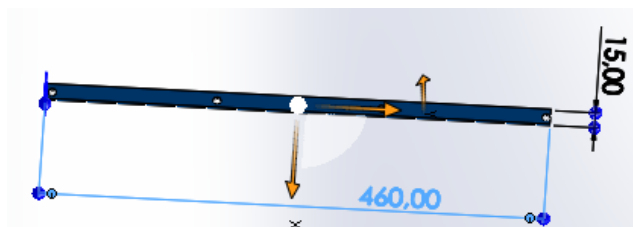


Figura 30. Medias de barra de transmisión del sistema de volteo en SolidWorks.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se ensamblaron todos los componentes en SolidWorks para verificar la correcta integración del sistema, el cual se evidencia en la figura 31. Se realizó un análisis del movimiento de las bandejas, asegurando que alcanzaran la inclinación mínima de 45 grados requerida para el volteo adecuado de los huevos. Además, se

comprobó que la transmisión de movimiento entre las bandejas fuera eficiente y funcional, garantizando un desplazamiento uniforme y sin interferencias. Esta simulación permitió anticipar posibles ajustes en el diseño antes de la fabricación, optimizando así el rendimiento del sistema de volteo.

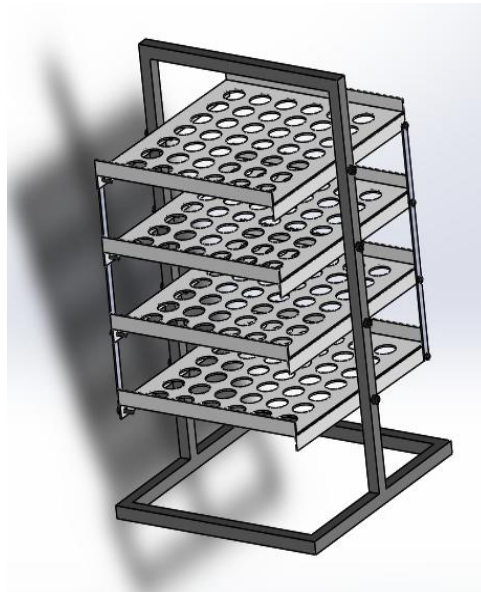


Figura 31. Ensamble conceptual del sistema de volteo
Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Ensamble final de sistema de incubación

En este paso, se completó el diseño de las piezas necesarias para el sistema, logrando una representación conceptual detallada con todos los componentes integrados a escala. Este diseño proporcionó una visión clara de la disposición e interacción de cada elemento, optimizando el espacio y asegurando la funcionalidad del sistema. Cada pieza fue diseñada con precisión para garantizar una integración eficiente y un desempeño óptimo. En la Figura 32, se presenta el diseño conceptual, evidenciando un avance significativo en la materialización del proyecto.



Figura 32. Ensamble final del sistema con todos los componentes
Fuente: Elaboración propia

3.4. Selección de Materiales y Actuadores

Para la selección de los materiales con los cuales se construirá la incubadora, se deben considerar varios factores esenciales. En primer lugar, los materiales estructurales deben ser lo suficientemente rígidos para soportar la estructura de la incubadora. Además, es crucial elegir materiales con baja conductividad térmica para minimizar la pérdida de calor desde el interior de la incubadora hacia el exterior, garantizando así un ambiente adecuado para la incubación. La accesibilidad económica también es un aspecto importante para tener en cuenta, ya que se busca evitar costos elevados en la construcción. Finalmente, los materiales seleccionados deben ser resistentes y duraderos, capaces de soportar las condiciones operativas de la incubadora a lo largo del tiempo. Esta combinación de características asegura que la incubadora funcione de manera eficiente a lo largo del tiempo y cumpla con los requisitos necesarios para el desarrollo óptimo de los huevos.

3.4.1. Soporte estructural de la incubadora

El soporte estructural de la incubadora se construyó utilizando ángulos de hierro de dimensiones de 6 m de longitud y sección de 1" x 1/8", acoplados mediante soldadura Miller. Este material fue seleccionado por su rigidez, necesaria para soportar la estructura de la incubadora de manera eficaz. Además, el ángulo de hierro está recubierto con una capa protectora contra la corrosión, lo que garantiza una mayor durabilidad en ambientes expuestos a la humedad, característica fundamental para la incubadora. Como se muestra en la Figura 33, las dimensiones de la estructura fueron calculadas en SolidWorks, lo que resultó en un requerimiento total de 10.4 metros de ángulo de hierro. Dado que este material se comercializa en longitudes de 6 metros, se adquirieron dos piezas, con una longitud total de 12 metros, suficiente para cubrir las necesidades estructurales del proyecto.

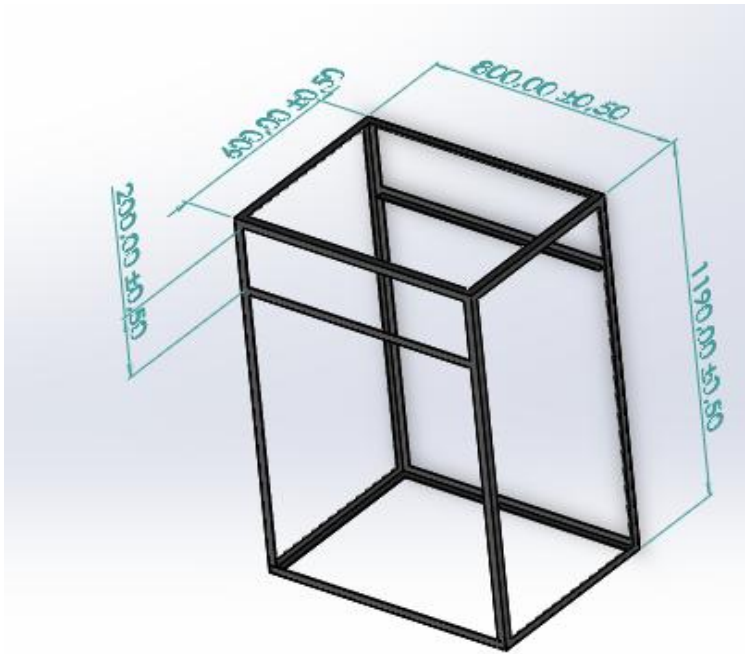


Figura 33. Soporte estructural de la incubadora.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Paredes de la Incubadora

El diseño de las paredes de la incubadora se basó en un enfoque de estructura tipo sándwich como se observa en la figura 34, optimizando el aislamiento térmico y la resistencia mecánica. La estructura está compuesta por una capa externa de MDF de 5 mm de espesor, seguida de una capa de poliestireno expandido de 10 mm, una capa de Thermolon de 3 mm, otra capa de MDF de 5 mm y, finalmente, una capa interna de Thermolon de 3 mm. Esta combinación de materiales permitió reducir significativamente la conductividad térmica hacia el exterior, asegurando la retención del calor dentro de la incubadora y creando un ambiente estable para el desarrollo embrionario. Además, esta configuración mejoró la resistencia estructural de las paredes, minimizando deformaciones e impactos, lo que garantizó una mayor durabilidad del sistema.

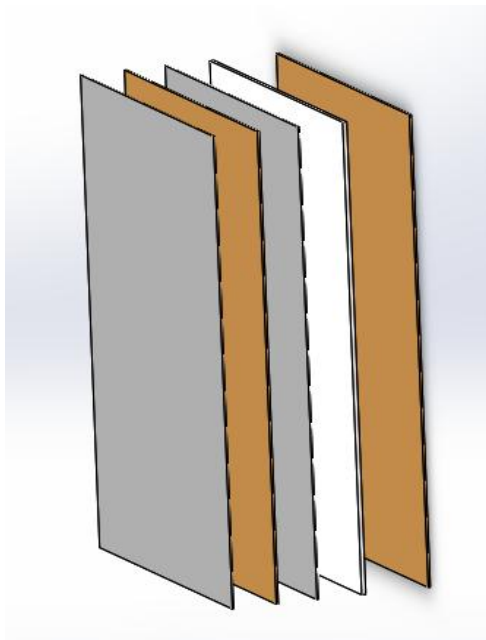


Figura 34. paredes de la incubadora
Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Selección de la resistencia

Para la selección de la resistencia calefactora, es esencial considerar las pérdidas de calor a través de las paredes de la incubadora, el calor necesario para elevar la temperatura del aire en el recinto y la energía requerida para calentar los huevos, considerando su masa y capacidad térmica. Con base en estos cálculos, se elige una resistencia que compense eficientemente las necesidades energéticas, garantizando que la incubadora mantenga condiciones térmicas óptimas para el desarrollo de los embriones, sin un consumo energético excesivo.

Los cálculos se basan en la ecuación de conducción de calor en estado estacionario para paredes planas compuestas, adecuada para analizar las múltiples capas de la incubadora, cada una con diferentes propiedades térmicas. También se toma en cuenta la diferencia de temperatura entre el ambiente externo y el habitáculo, utilizando datos climatológicos de Popayán, que registran temperaturas mínimas promedio de 13°C (como se muestra en la Figura 35). Este análisis asegura una estimación precisa de la eficiencia térmica, permitiendo mantener un ambiente óptimo para la incubación de los huevos.

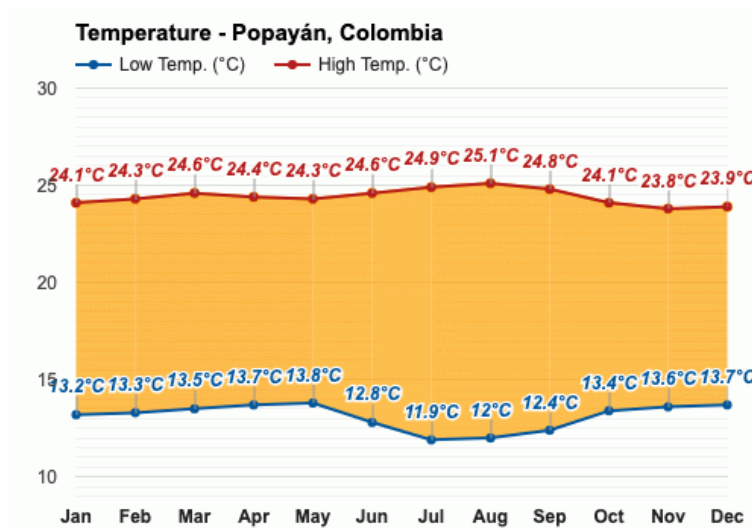


Figura 35. Temperatura media mínima Popayán, Colombia.
Fuente: [47]

3.4.3.1 Pérdidas de calor a través de las paredes

Comentado [JM28]: ¿?

Para realizar estos cálculos se empleó la Ecuación 6 [REF], donde se consideran las propiedades termodinámicas de los materiales que componen las paredes de la incubadora, tales como la conductividad térmica, el espesor de cada capa y la superficie total a través de la cual se transfiere el calor y la temperatura ambiente mínima promedio que se presenta en la ciudad de Popayán de 13°C. A continuación, se detallan los cálculos correspondientes a la incubadora.

$$Q = \frac{Te - Ti}{\frac{1}{Ap} \left(\frac{1}{h1} + \frac{e1}{K1} + \frac{e2}{K2} + \frac{e3}{K3} + \frac{1}{h2} \right)} \quad (6)$$

Dónde:

- a) **Q**: Potencia disipada (W)
- b) **Te**: Temperatura mínima exterior = 13°C
- c) **Ti**: Temperatura interior = 37.7°C
- d) **Ap**: Área de la superficie de la pared a través de la cual se realiza la transferencia de calor 0.96 m².
- e) **h1**: Coeficiente de convección interno = 20 W/m²·K.
- f) **h2**: Coeficiente de convección externo = 10 W/m²·K.
- g) **e1**: Espesor de la lámina de MDF = 0.005 m.
- h) **e2**: Espesor de la lámina de Icopor = 0.05 m
- i) **e3**: Espesor de la lámina de espuma Thermolon = 0.003 m.
- j) **k1**: Conductividad térmica del MDF = 0.076 W/m·K.
- k) **k2**: Conductividad térmica del Icopor = 0.030 W/m·K.
- l) **k3**: Conductividad térmica de Thermolon = 0.0484 W/m·K.

Para calcular la potencia disipada a través de la pared del fondo de la incubadora, que tiene dimensiones de 120 cm de altura por 80 cm de ancho, y está compuesta por una estructura tipo sándwich con las propiedades mencionadas anteriormente, se procederá a realizar el cálculo de la potencia disipada en esa pared como se detalla en la ecuación 7.

$$Q = \frac{38^{\circ}\text{C} - 13^{\circ}\text{C}}{\frac{1}{0.96\text{m}^2} \left(\frac{1}{10\text{W/m}^2\cdot\text{K}} + \frac{0.005\text{m}}{0.07\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.01\text{m}}{0.030\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.003\text{m}}{0.0484\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.005\text{m}}{0.07\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.003\text{m}}{0.0484\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{1}{20\text{W/m}^2\cdot\text{K}} \right)} = 32 \text{ W} \quad (7)$$

Por lo tanto, la cantidad de energía térmica que se pierde a través de la pared del fondo de la incubadora es 32 W.

Teniendo en cuenta que las paredes superior e inferior de la incubadora tienen un área de 0.48 m² cada una, el área total sumada de estas dos paredes es de 0.96 m², que coincide con el área de la pared del fondo. Por lo tanto, se puede aplicar el mismo cálculo utilizado para la pared del fondo. Esto resulta en una potencia disipada de 32W para ambas paredes, lo que demuestra que la contribución de estas paredes a la pérdida de energía térmica es comparable a la del fondo.

Para las paredes laterales de la incubadora, se realiza un cálculo similar al de la pared del fondo. En este caso, se considera que el área de superficie de cada pared lateral es de 0.72 m². Dado que hay dos paredes laterales, podemos calcular la potencia disipada en una de ellas y luego multiplicar el resultado por 2 para obtener la potencia total disipada por ambas paredes al aplicar la ecuación correspondiente, obtenemos una potencia disipada de 48W para las dos paredes laterales combinadas ecuación 8.

$$Q = 2 \cdot \frac{38^{\circ}\text{C} - 13^{\circ}\text{C}}{\frac{1}{0.72\text{m}^2} \left(\frac{1}{10\text{W/m}^2\cdot\text{K}} + \frac{0.005\text{m}}{0.07\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.01\text{m}}{0.030\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.003\text{m}}{0.0484\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.005\text{m}}{0.07\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{0.003\text{m}}{0.0484\text{W/m}\cdot\text{K}} + \frac{1}{20\text{W/m}^2\cdot\text{K}} \right)} = 2 \cdot 24\text{W} = 48\text{W} \quad (8)$$

Por lo tanto, la potencia disipada a través de todas las paredes de la incubadora sin incluir la puerta es de 80W

La energía disipada en la puerta de la incubadora se calculó en dos secciones: la parte de MDF y la ventanilla, tal como se muestra en la Figura 36. Estas secciones se consideraron como dos paredes distintas, permitiendo determinar la potencia disipada en cada una de ellas de manera individual. Este análisis facilitó la evaluación del impacto térmico de cada material en la conservación del calor dentro de la incubadora.

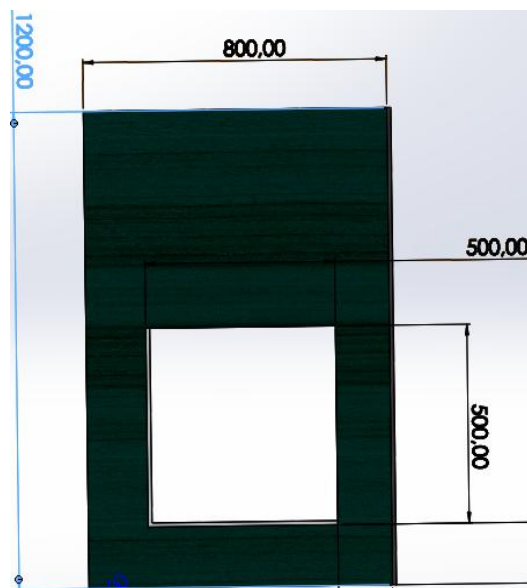


Figura 36. Energía disipada en la puerta de la incubadora se calculó en dos secciones: la parte de MDF y la ventanilla
Fuente: Elaboración propia

La energía disipada en la pared compuesta de la puerta se determina sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 9.

$$Q = \frac{38^{\circ}\text{C} - 13^{\circ}\text{C}}{\frac{1}{0.73\text{m}^2} \left(\frac{1}{10\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.005\text{m}}{0.07\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} + \frac{0.01\text{m}}{0.030\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} + \frac{0.003\text{m}}{0.0484\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} + \frac{0.005\text{m}}{0.07\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} + \frac{0.003\text{m}}{0.0484\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} + \frac{1}{20\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)} = 24 \text{ W} \quad (9)$$

Por lo tanto, habrá una pérdida de calor en la pared compuesta de 24 W. Se procedió a realizar el mismo cálculo para determinar la potencia transferida en la ventanilla, la cual está compuesta por dos láminas de acrílico de 3 mm de espesor, separadas por una capa de aire de 3.5 cm. Teniendo en cuenta que la conductividad térmica del acrílico es de 0.19 W/m·K y la conductividad térmica del aire es de 0.026 W/m·K a temperatura ambiente (20-25 °C), la potencia disipada en la ventana de acrílico se calcula utilizando la ecuación 10.

$$Q = \frac{38^{\circ}\text{C} - 13^{\circ}\text{C}}{\frac{1}{0.23\text{m}^2} \left(\frac{1}{10\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}} + \frac{0.035\text{m}}{0.02\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} + 2 \cdot \frac{0.003\text{m}}{0.19\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}} + \frac{1}{20\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)} = 3 \text{ W} \quad (10)$$

Por lo anterior, la potencia total disipada en toda la incubadora no es más que la suma de las potencias disipadas en cada una de sus 5 caras e incluyendo la puerta. En este caso, la potencia total disipada es de 97 W.

3.4.3.2 Energía necesaria para elevar la temperatura del aire en el recinto de incubación

Para calcular la energía requerida para aumentar la temperatura del aire dentro del recinto de incubación, es necesario utilizar la ecuación 11 de calor basada en la capacidad calorífica del aire [\[REF\]](#). Este enfoque permite determinar cuánta energía se debe suministrar para alcanzar la temperatura deseada, considerando el volumen de aire dentro de la incubadora.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (11)$$

❖ **Dónde:**

- **Q:** Calor en julios (J).
- **m:** Masa de aire en kilogramos (kg).
- **Cp:** Capacidad calorífica específica del aire a presión constante (1005 J/kg·K).
- **ΔT:** cambio de temperatura (en grados Centígrados, que en este caso es 38°C - 13°C = 25°C).

Primero se procede a calcular la **masa de aire** (m) dentro de la incubadora, usando la ecuación 12 de densidad:

$$m = \rho \cdot V \quad (12)$$

❖ **Dónde:**

- **ρ:** Densidad del aire a la temperatura inicial (a 13°C, la densidad es aproximadamente 1.246 kg/m³).
- **V:** Volumen de la incubadora (0.576 m³).

Con los datos de Densidad y Volumen conocidos se halló la masa del aire como se muestra en la ecuación 13.

Comentado [JM29]: ¿?

$$m = 1.246 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.576m^3 = 0.72kg \text{ (13)}$$

La energía necesaria para aumentar la temperatura del aire dentro del recinto de incubación se calcula utilizando la Ecuación 14, que expresa el calor necesario (Q) en función de la masa del aire, su capacidad térmica y la diferencia de temperatura que se desea alcanzar. Al sustituir los valores pertinentes en esta ecuación, se obtiene una estimación de la energía requerida.

Comentado [JM30]: Pero esta es la misma 11

$$Q = 0.72kg \cdot 1005 \frac{J}{kg \cdot K} \cdot 25K = 18090J \text{ (14)}$$

Por lo tanto, la energía necesaria para elevar la temperatura del aire dentro de la incubadora de 13°C a 38°C es de 18090 J (julios). Para determinar la potencia necesaria, considerando un tiempo de 1 hora para un calentamiento lento del aire, se utilizó la ecuación 15 de potencia:

$$P = \frac{E}{t} \text{ (15)}$$

❖ **Dónde:**

- **P** Potencia en vatios (W).
- **E** Energía en julios (J), que en este caso es 18,011.925 J.
- **t** Tiempo en segundos. Dado que se considera una hora, $t = 3600$ s.

Remitiendo los valores a la ecuación 16 se obtuvo la potencia que ese requiere para elevar la temperatura del recinto en el transcurso de una hora.

$$P = \frac{18011J}{3600s} = 5W \text{ (16)}$$

Por lo tanto, se necesitarán al menos 5 W para elevar la temperatura del recinto en el transcurso de una hora.

3.4.3.3 La energía necesaria para elevar la temperatura de los huevos

Para determinar la energía total requerida para elevar la temperatura de los 164 huevos en la incubadora, se utilizó la ecuación 11 de calor previamente mencionada, la cual permite calcular la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura

de un cuerpo desde un valor inicial hasta una temperatura objetivo. En este caso, se consideraron las propiedades térmicas de los huevos, como su masa y capacidad calorífica, con el fin de estimar con precisión la energía que el sistema debía suministrar para alcanzar y mantener las condiciones óptimas de incubación.

❖ Donde:

- **Número de huevos:** 164
- **Peso de cada huevo:** 70 g = 0.07 kg
- **Capacidad calorífica específica del huevo:** 3.32 kJ/kg·°C = 3320 J/kg·°C (convertido a julios)
- **Temperatura inicial (T1):** 13 °C
- **Temperatura final (T2):** 38 °C
- **Cambio de temperatura (ΔT):** T2-T1=38-13=25°

La masa total de los huevos se determina utilizando la Ecuación 17, que considera el peso promedio de cada huevo, estimado en 0.07 kg.

❖ **Masa total de los huevos:**

$$m = 164 \text{ huevos} \cdot 0.07 \frac{\text{kg}}{\text{huevo}} = 11.48 \text{ kg} \quad (17)$$

Por lo tanto, la energía necesaria para calentar los huevos se calcula mediante la Ecuación 18:

❖ **Energía requerida (Q):**

$$Q = 11.48 \text{ kg} \cdot 3320 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 25^\circ\text{C} = 952840 \text{ J} \quad (18)$$

La energía requerida para elevar la temperatura de 164 huevos de 13 °C a 38 °C es 952,840 J. Para determinar la potencia necesaria para calentar los huevos, se hace referencia a la Ecuación 8, considerando un tiempo de calentamiento de 12 horas. Este intervalo permite un aumento gradual de la temperatura, evitando cambios bruscos que podrían impactar negativamente el desarrollo embrionario. La potencia se calcula como se muestra en la ecuación 19:

$$P = \frac{952840J}{43200s} = 22W \text{ (19)}$$

Por lo tanto, se requiere una potencia de 22 W para elevar la temperatura de los huevos desde 13°C hasta 38°C en un período de 12 horas.

Una vez calculadas las potencias, se procedió a sumarlas para seleccionar la resistencia calefactora, obteniendo un total de 107 W. Por lo tanto, fue necesario elegir una resistencia que superara este requerimiento de potencia. Para ello, se seleccionaron dos resistencias de silicona de 100 W cada una, como se muestra en la figura 37, que suman un total de 200 W. Esta capacidad no solo es suficiente para cubrir las necesidades del sistema, sino que también proporciona un amplio margen de seguridad para evitar posibles fallas relacionadas con el consumo de potencia.



Figura 37. Resistencia de silicona 100w.
Fuente: [48]

3.4.4. Selección del motor

En el diseño de sistemas mecánicos, el cálculo del torque es fundamental para garantizar un funcionamiento adecuado y eficiente. Según Shigley y Mischke [49], el torque en un sistema rotacional depende de la fuerza aplicada y el radio en el que esta actúa. En este caso, el sistema de volteo de la incubadora se basa en una transmisión

por piñón-cadena, donde la eficiencia del mecanismo se ve influenciada por la relación de transmisión y la reducción de carga directa sobre el motor.

La transmisión por piñón-cadena permite optimizar el rendimiento del sistema, ya que reduce el esfuerzo requerido por el motor al distribuir la carga a través de los elementos mecánicos de la transmisión. Además, este tipo de mecanismo es altamente eficiente en la conversión de movimiento rotacional y minimiza las pérdidas por fricción en comparación con otros sistemas de transmisión de potencia.

Dado que el motor solo necesita generar el torque suficiente para rotar el sistema hasta 45° , y no levantar directamente la carga, la selección adecuada del motor y el tamaño del piñón es crucial para optimizar la potencia requerida. Además, los factores de seguridad y eficiencia mecánica juegan un papel importante en la determinación final del torque necesario.

3.4.4.1 Determinación de la fuerza ejercida por los huevos

Para determinar el torque requerido en el sistema de volteo de una incubadora de huevos, se analizaron variables clave como el peso unitario de cada huevo (0.07 kg), la cantidad de huevos por bandeja (88 en bandejas comerciales y 36 en bandejas de diseño acrílico) y el número de niveles del sistema, que es de cuatro. En el caso de las bandejas comerciales, el sistema alberga un total de 352 huevos, con un peso total de 24.7 kg, mientras que el sistema con bandejas acrílicas contiene 144 huevos, alcanzando un peso total de 10.08 kg.

A partir de estos datos y usando la aceleración gravitacional estándar (9.81 m/s^2), se calculó la fuerza ejercida por los huevos en ambos casos. Para el sistema con 352 huevos, la fuerza total es de 241.72 N, y para el sistema con 144 huevos, la fuerza es de 98.29 N. Estos valores son fundamentales para el diseño y selección del actuador o motor que permita realizar el volteo de manera eficiente y segura.

3.4.4.2 Cálculo del torque

El torque (τ) se calcula como el producto de la fuerza aplicada y el radio del sistema de volteo. Dado que el sistema de volteo está acoplado a un mecanismo de piñón-cadena, este sistema de transmisión permite optimizar la eficiencia al reducir la carga

directa sobre el motor y distribuir el esfuerzo a través de la cadena. Al utilizar un piñón de menor diámetro, se incrementa el torque transmitido, facilitando el movimiento del sistema de volteo con menor consumo energético y desgaste mecánico.

El radio efectivo dependerá del diámetro del piñón. Se tiene un piñón de 15 dientes con un diámetro de 6 cm, por lo que el radio se calcula con la ecuación 20:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{6}{2} = 3cm = 0.03m \quad (20)$$

Para la obtención del torque se utilizó la ecuación 21.

$$\tau = F * r \quad (21)$$

❖ Donde:

- **T**: Torque
- **F**: fuerza
- **r**: radio del piñón

Para el caso de las bandejas comerciales (352 huevos) se reemplazan los valores en la ecuación 21:

$$\tau_{320} = 241.71 N * 0.03m = 7.25 N \cdot m$$

Comentado [JM31]: ¿?

Para el caso de las bandejas en acrílico (144 huevos) se reemplazan los valores en la ecuación 21:

$$\tau_{144} = 98.29 N * 0.03m = 2.95 N \cdot m$$

3.4.4.3 Análisis del torque del motor

Es importante aclarar que el motor no levanta directamente el peso de los huevos, sino que únicamente proporciona el movimiento de rotación hasta 45° en el sistema de volteo. El peso de los huevos está soportado por la estructura del mecanismo y no recae sobre el motor.

El torque calculado representa la fuerza mínima requerida para mover la carga, pero se debe considerar un factor de seguridad para compensar pérdidas por fricción, inercia y eficiencia del sistema mecánico. Usualmente, se recomienda un factor de seguridad de al menos 1.5 a 2 veces el torque mínimo [\[REF\]](#).

Aplicando un factor de seguridad de 1.5, se obtuvo el valor del torque para el caso de las bandejas comerciales (320 huevos):

$$\tau_{352} = 7.25 \text{ N} \cdot \text{m} * 1.5 = 10.875 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Por otro lado, para el caso de las bandejas realizadas (144 huevos):

$$\tau_{144} = 2.95 \text{ N} \cdot \text{m} * 1.5 = 4.43 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, el motor debe ser seleccionado con un torque mínimo de 10.87 N·m para el caso de 352 huevos y 4.43 N·m para el caso de 144 huevos, considerando un factor de seguridad de 1.5. Estos valores aseguran que el sistema de volteo funcione de manera eficiente sin sobrecargar el motor y manteniendo un margen adecuado para compensar pérdidas por fricción y eficiencia mecánica.

3.4.4.4 Motor utilizado

El sistema de volteo está acoplado a un mecanismo de piñón-cadena, lo que permitirá reducir la carga directa sobre el motor y optimizar el consumo energético.

Se consideró el uso de un motor de plumillas de 12V DC (ver figura 38), que ya cuenta con una caja de reducción integrada, lo cual lo hace ideal para esta aplicación, ya que su sistema interno optimiza la entrega de torque sin necesidad de una caja adicional de reducción externa.

Según las especificaciones del motor, el torque nominal es de aproximadamente 18 N·m, con una velocidad nominal de 54 RPM. Dado que el sistema piñón-cadena introduce una relación de transmisión, el torque efectivo en el mecanismo de volteo se incrementa, permitiendo una operación eficiente.



Figura 38. Motor de plumillas utilizado para el sistema de volteo
Fuente: Elaboración Propia

Dado que el motor solo realiza el movimiento de rotación y no soporta el peso de los huevos, el diseño del mecanismo y la correcta distribución de cargas en la estructura son clave para la eficiencia del sistema. Además, la relación de transmisión del sistema piñón-cadena influye en la conversión de la velocidad angular en mayor torque efectivo sobre el eje del volteo, asegurando un desplazamiento controlado y preciso. El motor ha sido correctamente adaptado al sistema de incubación para garantizar una operación eficiente y confiable.

Comentado [JM32]: ¿?

3.4.5. Selección del humidificador

Dentro de la incubadora, una vez estabilizada la temperatura a 38°C, se observa que la humedad relativa disminuye al 40% debido al aumento de temperatura. El objetivo de este análisis es incrementar la humedad relativa desde 40% hasta 80% dentro del recinto, con el fin de crear un ambiente óptimo para el desarrollo de los embriones en la fase de la nacedera donde la humedad esta entre el 75% y 80% de humedad relativa.

Este ajuste es fundamental, ya que, al elevar la temperatura, el aire aumenta su capacidad para retener vapor de agua, lo que provoca una reducción en la humedad relativa inicial. Por ello, es crucial que el sistema de humidificación sea capaz de compensar esta pérdida de humedad y mantener las condiciones internas dentro de los rangos ideales para la incubación.

Comentado [JM33]: En donde se observa? Si esto no lo consideraron en las primeras pruebas, este no es el lugar de colocarlo, pueden ubicarlos después de la implementación del sistema. O pueden iniciar el párrafo de una forma diferente indicando que el incremento de la temperatura afecta la humedad y por eso es necesario considerar implementar un humidificador

La cantidad de agua necesaria para incrementar la humedad se obtuvo tomando en cuenta las propiedades termodinámicas del aire y su capacidad para contener vapor de agua a 38°C. Esto asegura que el humidificador seleccionado pueda mantener las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo óptimo de los embriones.

Condiciones Iniciales:

- Temperatura (T): 38°C
- Humedad Relativa (ϕ o HR): 40% (0.4)
- Presión de Saturación a 38°C (Ps): 49.750 mmHg

A continuación, en la Figura 39, se presenta la tabla de presión de vapor saturado, la cual se utilizó para determinar la presión de vapor de saturación a 38°C. Esta información es fundamental para calcular la cantidad de agua que debe vaporizarse, asegurando así las condiciones óptimas de humedad dentro de la incubadora.

T/°C	P/mmHg	P/hPa	T/°C	P/mmHg	P/hPa	T/°C	P/mmHg	P/hPa
0	4.5840	6.1115	47	79.709	106.27	95	634.61	846.08
0.01	4.58780	6.11657	48	83.834	111.77	96	658.34	877.71
1	4.9286	6.5709	49	88.147	117.52	97	682.78	910.30
2	5.2954	7.0599	50	92.648	123.52	98	707.98	943.90
3	5.6861	7.5808	51	97.343	129.78	99	733.95	978.52
4	6.1021	8.1355	52	102.24	136.31	100	760.00	1013.3
5	6.5449	8.7258	53	107.35	143.12	101	787.57	1050.0
6	7.0158	9.3536	54	112.67	150.22	102	815.86	1087.7
7	7.5164	10.021	55	118.23	157.62	103	845.12	1126.7
8	8.0482	10.730	56	124.01	165.33	104	875.06	1166.7
9	8.6130	11.483	57	130.03	173.36	105	906.07	1208.0
10	9.2123	12.282	58	136.29	181.71	106	937.92	1250.5
11	9.8483	13.130	59	142.82	190.41	107	970.60	1294.0
12	10.522	14.028	60	149.61	199.46	108	1004.42	1339.12
13	11.237	14.981	61	156.67	208.88	109	1038.92	1385.11
14	11.993	15.990	62	164.02	218.67	110	1074.56	1432.63
15	12.795	17.058	63	171.65	228.85	111	1111.20	1481.48
16	13.642	18.188	64	179.59	239.43	112	1148.74	1531.53
17	14.539	19.384	65	187.83	250.42	113	1187.42	1583.10
18	15.487	20.647	66	196.39	261.83	114	1227.25	1636.20
19	16.489	21.983	67	205.28	273.68	115	1267.98	1690.50
20	17.546	23.393	68	214.51	285.99	120	1489.14	1985.36
21	18.663	24.882	69	224.09	298.76	125	1740.93	2321.05
22	19.841	26.453	70	234.03	312.01	130	2026.10	2701.24
23	21.085	28.111	71	244.33	325.75	135	2347.26	3129.42
24	22.395	29.858	72	255.02	340.00	140	2710.92	3614.26
25	23.776	31.699	73	266.11	354.78	145	3116.76	4155.34
26	25.231	33.639	74	277.59	370.09	150	3570.48	4760.25
27	26.763	35.681	75	289.49	385.95	175	6694.08	8924.71
28	28.376	37.831	76	301.82	402.39	200	11 659.16	15 544.27
29	30.071	40.092	77	314.58	419.41	225	19 123.12	25 495.40
30	31.855	42.470	78	327.80	437.03	250	29 817.84	39 753.85
31	33.730	44.969	79	341.48	455.27	275	44 580.84	59 436.23
32	35.700	47.596	80	355.63	474.14	300	64 432.8	85 903.3
33	37.769	50.354	81	370.28	493.67	325	90 447.6	120 587
34	39.942	53.251	82	385.43	513.87	350	124 001.6	165 321.9
35	42.221	56.290	83	401.10	534.76	360	139 893.2	186 508.9
36	44.613	59.479	84	417.30	556.35	365	148 519.2	198 009.3
37	47.121	62.823	85	434.04	578.67	366	150 320.4	200 410.7
38	49.750	66.328	86	451.33	601.73	367	152 129.2	202 822.3
39	52.506	70.002	87	469.21	625.56	368	153 960.8	205 264.2
40	55.391	73.849	88	487.67	650.17	369	155 815.2	207 736.5
41	58.413	77.878	89	506.73	675.58	370	157 692.4	210 239.2
42	61.577	82.096	90	526.41	701.82	371	159 584.8	212 762.2
43	64.886	86.508	91	546.72	728.90	372	161 507.6	215 325.8
44	68.349	91.124	92	567.68	756.84	373	163 468.4	217 939.9
45	71.968	95.950	93	589.31	785.68	373.946	165 452.0	220 584.5
46	75.749	100.99	94	611.61	815.41			

Figura 39. Presión de vapor de agua líquida y hielo a varias temperaturas.

Fuente: [50]

La presión de vapor de agua se calcula mediante la ecuación 21[REF], donde esta relación es clave en la selección del humidificador, asegurando las condiciones óptimas de humedad para el sistema de incubación.

$$P_v = H_r * P_s \quad (21)$$

Dónde:

- **HR:** Humedad relativa.
- **Pv:** presión parcial del vapor de agua (en mmHg).
- **Ps:** Presión de vapor de saturación a la temperatura de interés (en mmHg).

Al reemplazar los valores, se obtiene la Ecuación 22, que permite hallar el valor de la presión parcial del vapor de agua (en mmHg).

$$Pv = 0.4 * 49.750 = 19.9 \text{ mmHg} \quad (22)$$

Con estos datos, es posible calcular la masa de agua presente en el aire dentro de la incubadora. Es fundamental aclarar que, según la Ley de Dalton, el volumen total del aire es equivalente al volumen del vapor de agua, lo que permite considerar el volumen de la incubadora como un único sistema [\[REF\]](#). Para este cálculo, se utiliza la Ecuación 24 del gas ideal, que se expresa de la siguiente manera:

$$Pv * V = n * R * T \quad (24)$$

❖ **Dónde:**

- **Pv:** presión parcial del vapor de agua 0.02618421 atm.
- **V:** Volumen del interior de la incubadora 576 L.
- **n:** número de moles de vapor de agua (Incógnita)
- **R** = Constante universal de los gases = 0.08206 L*atm/mol*°K
- **T** = Temperatura en el interior en modo incubadora = 311.15°K

Finalmente, se determina el número de moles de vapor de agua utilizando la Ecuación 25, que arroja un valor de 0.59 mol de H₂O. Este cálculo es fundamental para estimar la cantidad de agua que se debe vaporizar dentro de la incubadora para alcanzar la humedad relativa deseada

$$n = \frac{0.02618421 \text{ atm} * 576 \text{ L}}{0.08206 \frac{\text{atm} * \text{L}}{\text{mol} * \text{K}} * 311.15 \text{ K}} = 0.59 \text{ mol de H}_2\text{O} \quad (25)$$

Finalmente, se obtiene 0.59 mol de H₂O. Para convertir este valor a mililitros de agua, se utilizó el factor de conversión mostrado en la Ecuación 26, que permite transformar moles de agua a volumen en mililitros, dado que 1 mol de agua equivale aproximadamente a 18.015 g y 1 g de agua es igual a 1 ml

$$0.59 \text{ mol de } H_2O \left(\frac{18 \text{ g de } H_2O}{\text{mol de } H_2O} \right) = 10.62 \text{ g de } H_2O = 10.62 \text{ ml (26)}$$

Por lo tanto, 10.62 gramos de agua son equivalentes a 10.62 mililitros, basado en el principio de que un gramo de agua ocupa un mililitro. Así, si se dispone de 10.62 gramos de agua, ocupará exactamente 10.62 mililitros. Esta relación se debe a que la densidad del agua es aproximadamente 1 g/ml a temperatura ambiente, lo que permite esta conversión directa entre masa y volumen.

Se considera que la temperatura ideal para las incubadoras de huevos de gallina oscila entre 37.5 °C y 37.7 °C, mientras que en las nacederas debe estar entre 36.1 °C y 37.2 °C. Es importante reducir la temperatura en los últimos 2 a 3 días de incubación, lo que implica que los ajustes de temperatura deben realizarse de acuerdo con las diferentes etapas del proceso de incubación [9].

El aumento de la humedad relativa al 75% durante el proceso de incubación de huevos de gallina criolla representa un factor crítico, como se evidencia en el estudio titulado 'evaluación de la tasa de incubación en huevos de gallina criolla (*Gallus gallus domesticus*)' utilizando diferentes porcentajes de humedad mediante incubación artificial por Cindy Xiomara Villamar Noboa' [51]. Este nivel de humedad favorece una mayor tasa de natalidad, alcanzando un 93.06% en el tratamiento correspondiente. La adecuada humidificación evita la deshidratación de los embriones, lo que es esencial para su desarrollo y viabilidad. Además, la investigación sugiere que mantener la humedad en este nivel óptimo reduce significativamente la mortalidad embrionaria, contribuyendo así a un entorno más propicio para el crecimiento de los polluelos

Comentado [JM34]: Colocar la numeración de la referencia

Por lo tanto, estableceremos una temperatura final de 37 grados Celsius y una humedad relativa del 75% para los cálculos pertinentes. Con estos parámetros, se procede a determinar la masa de agua presente en el aire de la nacedera, utilizando la ecuación 26 del gas ideal, considerando los valores correspondientes a 37 grados y 75% de humedad en el modo de funcionamiento de la nacedera.

Condiciones Iniciales

❖ **T:** 37°C Temperatura

- ❖ ϕ : HR = 75% Humedad Relativa 0.75
- ❖ P_s : Saturación a 37°C = 47.121mmHg

En la figura 38 se presenta una tabla, que muestra la presión de vapor saturado utilizada para calcular la presión de vapor de saturación (en mmHg) a una temperatura de 37°C, la cual es de 47.121 mmHg.

Remplazando en la ecuación 24 de humedad relativa se obtuvo que

$$P_v = 0.75 \cdot 47.121 = 35.341 \text{ mmHg}$$

Con el valor de presión parcial de vapor de agua hallado anteriormente se procede a calcular la masa de agua presente en el aire en el modo nacedera con la ecuación del gas ideal

$$n = \frac{0.046 \text{ atm} \cdot 576 \text{ L}}{0.08206 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 310.15 \text{ K}} = 1.052 \text{ mol de H}_2\text{O}$$

Para convertir moles de agua a mililitro

Comentado [JM35]: ¿?

Por lo tanto, 18.936 gramos de agua son equivalentes a 18.936 mililitros, basado en el principio de que un gramo de agua ocupa un mililitro. Así, si se dispone de 18.936 gramos de agua, ocupará exactamente 18.936 mililitros. Esta relación se debe a que la densidad del agua es aproximadamente 1 g/ml a temperatura ambiente, lo que permite esta conversión directa entre masa y volumen.

Comentado [JM36]: Esto ya se dijo

Para ajustar las condiciones del entorno de incubación de 40% de humedad relativa a 38°C a 75% de humedad relativa a 37°C, es necesario incrementar la cantidad de vapor de agua presente en el aire dentro de la incubadora.

Este requerimiento se basa en los valores previamente calculados de contenido de agua en el aire para diferentes combinaciones de temperatura y humedad relativa:

- **A 38°C y 40% de humedad relativa:** Se tiene aproximadamente 10.62 ml de agua.
- **A 37°C y 75% de humedad relativa:** Se tiene aproximadamente 18.93 ml de agua.

Esto significa que para elevar la humedad relativa en la incubadora de un 40% a un 75% y al reducir la temperatura de 38°C a 37°C se deberá añadir 8.31 ml de agua adicional al ambiente en un corto tiempo a la incubadora

Por lo anterior el humidificador seleccionado fue de Humidificador Atomizador Ultrasónico ya que tiene capacidad de Humidificación capacidad: 4.2ml/min a 7.5 ml/min lo cual es más que suficiente para la incubadora en sus 2 modos

3.4.6. Buzzer

El buzzer utilizado en el sistema de incubación, como se muestra en la figura 40, proporciona una señal acústica que mejora la interacción del usuario con el menú de control. Al presionar los botones, emite un sonido que confirma que la acción ha sido registrada. Esta función ofrece retroalimentación inmediata y ayuda a alertar al usuario sobre eventos importantes, contribuyendo a un manejo más intuitivo y eficaz del sistema. Su integración es fundamental para garantizar una experiencia de usuario satisfactoria.



Figura 40. buzzer utilizado en el sistema de incubación.
Fuente:[52]

3.4.7. Sirena

La sirena, como se muestra en la figura 41, se utiliza en el sistema de incubación para alertar sobre condiciones anormales, como un exceso o una caída en la temperatura o humedad. Este dispositivo se activa automáticamente si las variables críticas fallan, garantizando que el usuario sea notificado de inmediato. Su implementación es esencial para la seguridad del proceso de incubación, permitiendo tomar medidas correctivas rápidamente y asegurando el bienestar de los embriones en desarrollo.



*Figura 41. Sirena utilizada en el sistema de incubación.
Fuente:[53]*

3.5. Selección de Sensores

En esta sección, se describen los sensores y actuadores seleccionados para garantizar el control preciso de las condiciones ambientales dentro de la incubadora. Estos componentes son esenciales para mantener los niveles óptimos de temperatura, humedad y calidad del aire, asegurando un ambiente adecuado para el desarrollo embrionario. La selección de cada sensor y actuador se ha realizado con base en su precisión, fiabilidad y compatibilidad con el sistema, lo que permite una operación eficiente y segura durante todo el proceso de incubación.

3.5.1. Sensor de temperatura

Para monitorear y controlar la temperatura dentro de la incubadora, se ha seleccionado el sensor DHT22, como se muestra en la Figura 41. Este sensor destaca por su alta

Dio formato: Resaltar

precisión y su amplio rango de medición de temperatura, que va de -40°C a 80°C [54], características fundamentales para mantener la temperatura constante cerca de los 38°C , el valor óptimo para la incubación de huevos. Con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, el DHT22 garantiza que cualquier variación en la temperatura sea detectada con rapidez, lo que permite una respuesta oportuna del sistema de calefacción para mantener un entorno adecuado. Para monitorear y controlar la temperatura dentro de la incubadora, se seleccionó un sensor DHT22, como se muestra en la Figura 42. Este sensor destaca por su alta precisión y su amplio rango de medición de temperatura, que va de -40°C a 80°C [54], características fundamentales para mantener la temperatura constante cerca de los 38°C , el valor óptimo para la incubación de huevos. Con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, el DHT22 garantiza que cualquier variación en la temperatura sea detectada con rapidez, lo que permite una respuesta oportuna del sistema de calefacción para mantener un entorno adecuado.

Dio formato: Resaltar

Comentado [JM37]: Verificar existe información repetida

Además de su precisión, el DHT22 es fácil de integrar con microcontroladores como Arduino, gracias a su salida digital que permite una lectura directa de los datos. Su robustez y fiabilidad en condiciones de humedad alta lo hacen ideal para un entorno controlado como la incubadora, donde se requiere mantener tanto la temperatura como la humedad en los niveles adecuados.



Figura 42. Sensor de temperatura DHT22 utilizado en la incubadora
Fuente:[55]

3.5.2. Sensor de Humedad

Comentado [JM38]: Unan las dos secciones pues es el mismo sensor que mide las dos variables

El sensor DHT22 también se utiliza para monitorear la humedad relativa dentro de la incubadora, como se muestra en la Figura 42. Con una precisión de $\pm 2-5\%$ para la

humedad relativa, este sensor es clave para mantener el rango óptimo de 60% a 80% durante la incubación, particularmente en la fase final, donde los embriones necesitan un ambiente más húmedo.

El DHT22 es capaz de medir la humedad relativa en un rango de 0 a 100%, lo que lo convierte en una herramienta eficaz para detectar cualquier variación en los niveles de humedad y activar el sistema de humidificación en caso de ser necesario. Además, su salida digital permite una integración sencilla con sistemas de control, como Arduino, garantizando que los niveles de humedad se mantengan estables y adecuados para el desarrollo de los embriones.

3.5.3. Sensor de Co2

Para monitorear los niveles de dióxido de carbono (CO_2) dentro de la incubadora, se ha seleccionado el sensor MQ135[56], como se muestra en la figura 43. Este sensor es ideal para detectar y medir concentraciones de gases nocivos, incluyendo el CO_2 , con un rango operativo de 300 a 3000 ppm, adecuado para las necesidades de incubación, donde es crucial mantener un ambiente controlado y saludable para los embriones.



Figura 43. Sensor de dióxido de carbono (CO_2) MQ135
Fuente: [56]

3.5.4. Módulo de reloj DS3231

El módulo de reloj DS3231, como se muestra en la figura 44, es un dispositivo de alta precisión diseñado para el seguimiento exacto del tiempo y fecha en aplicaciones embebidas. Este módulo cuenta con un oscilador de temperatura compensada que asegura una precisión de ± 2 minutos al año [57], lo que lo convierte en una opción ideal para proyectos que requieren un cronometraje confiable, como en el caso de la incubadora. En este sistema, el DS3231 es fundamental para llevar el tiempo de incubación, garantizando que se mantenga un registro continuo incluso en caso de apagón del Arduino. Su capacidad para almacenar la hora y la fecha permite la recuperación inmediata de la información al reiniciar el sistema. Además, su interfaz I2C facilita la integración con microcontroladores como Arduino, permitiendo un acceso sencillo a la información temporal y mejorando la automatización del sistema.



*Figura 44. Módulo de reloj DS3231.
Fuente: [58]*

3.6. Diseño Electrónico

El diseño electrónico del sistema de incubación se fundamenta en una integración eficiente de diversos componentes que permiten monitorear y controlar las condiciones ambientales necesarias para el desarrollo óptimo de los embriones. En la figura 45 se presenta el esquemático general del circuito, donde se pueden observar las conexiones entre sensores, actuadores y la unidad de control. Cada componente desempeña un papel crucial: los sensores recopilan datos sobre temperatura, humedad y niveles de CO₂, mientras que los actuadores responden a estas variables,

asegurando un ambiente estable y controlado. A continuación, se describirán en detalle las entradas y salidas del sistema, así como la función de cada elemento en el circuito.

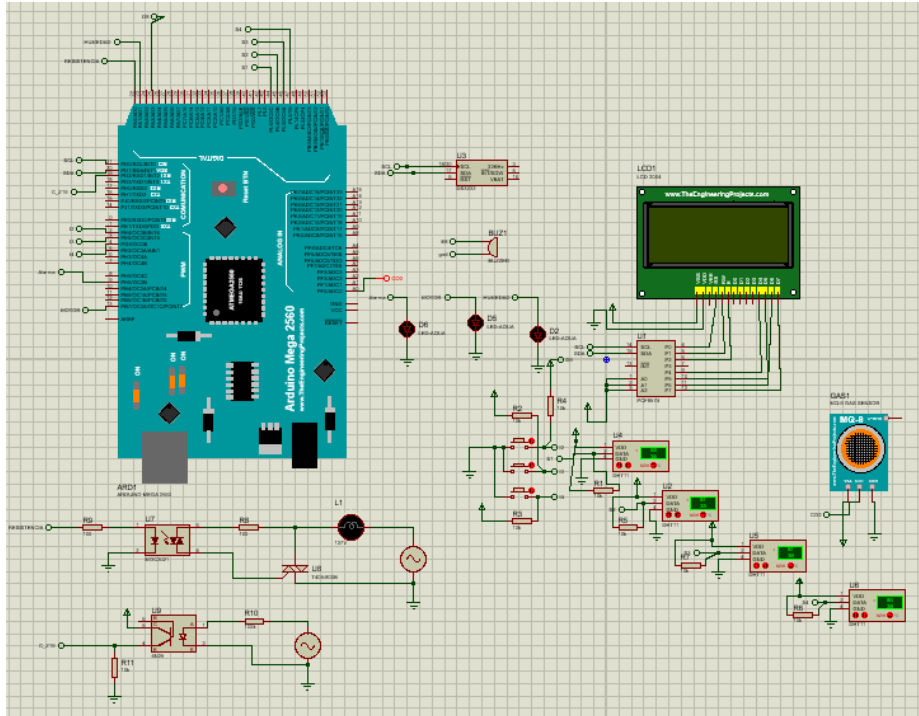


Figura 45. Esquemático general del circuito eléctrico de la incubadora.
Fuente: Elaboración propia

3.6.1. Controlador

Para la base del control se utilizó un Arduino Mega [59] como se muestra en la figura 46, debido a que cuenta con suficientes **entradas y salidas** digitales para la conexión de todos los sensores, actuadores, **entradas y salidas** del sistema. Esta placa fue elegida por su gran capacidad de manejo de periféricos, su memoria ampliada, y por la facilidad de programación que ofrece, lo que la convierte en una opción ideal para

Dio formato: Resaltar

Dio formato: Resaltar

proyectos que requieren múltiples conexiones y un procesamiento eficiente de datos en tiempo real.

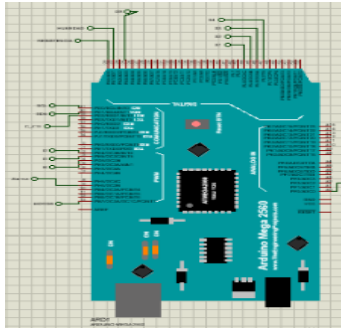


Figura 46. Arduino Mega r3
Fuente: Elaboración Propia.

3.6.2. Control de la resistencia [calefactora](#)

En la Figura 47, se ilustra el control de la resistencia mediante un circuito de control de potencia que utiliza un optoacoplador MOC3021 y un TRIAC. Este diseño permite activar o desactivar la resistencia a través de la salida de 5V del Arduino, evitando así el desgaste mecánico asociado a los relés y prolongando su vida útil. Además, se incluye un circuito de detección de cruce por cero, implementado con un optoacoplador 4N25, que envía señales al Arduino al detectar el cruce por cero en la onda sinusoidal de la red eléctrica. Este sistema está integrado para facilitar la transición a un control PID en la gestión de la temperatura.

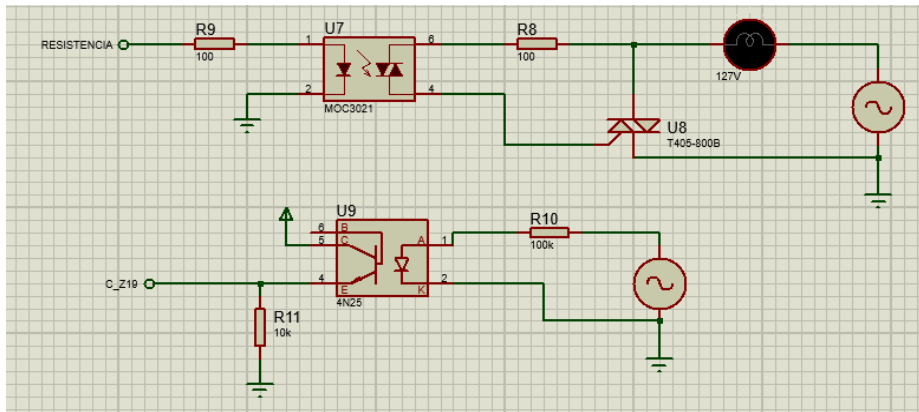


Figura 47. Circuito de control de potencia de la resistencia y detector de cruce por cero.
Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Optoacoplador MOC3021

Como se muestra en la figura 48 el optoacoplador es un dispositivo utilizado para controlar cargas de potencia, como resistencias calefactoras, mediante un triac. Su diseño permite la separación eléctrica entre el circuito de control y la carga, lo que protege el microcontrolador de posibles picos de voltaje [60]. Además, su capacidad para manejar altas corrientes de salida lo convierte en una opción ideal para aplicaciones de control de potencia.



www.electronicaplugandplay.com

Figura 48. Optoacoplador MOC 3021
Fuente: [61]]

3.6.4. Optoacoplador 4N25

Este optoacoplador, que combina un LED infrarrojo con un fototransistor, permite la transferencia de señales entre circuitos de diferentes niveles de voltaje. Se utiliza en la detección de cruce por cero para sincronizar el control de cargas AC con las señales del microcontrolador[60]. Su diseño protege el circuito de control de interferencias externas y asegura un funcionamiento confiable y seguro, siendo un componente clave en el sistema de control de potencia, como se detalla en la figura 49.



Figura 49. Optoacoplador 4N25
Fuente: [62]

3.6.5. Sensores Dht22

Para el diseño de los sensores de la incubadora, se utilizaron cuatro DHT22, uno para cada bandeja (ver Figura 50), conectados a los pines 44, 45, 46 y 47 del Arduino Mega. Cada sensor mide la temperatura y la humedad de su bandeja respectiva. Dado que pueden existir errores debido a la tolerancia de los sensores, es posible su calibración desde la pantalla del sistema (ver sección Interfaz Usuario-Máquina). La calibración se realiza ajustando los valores medidos, sumando o restando grados en comparación con una sonda de mayor precisión.

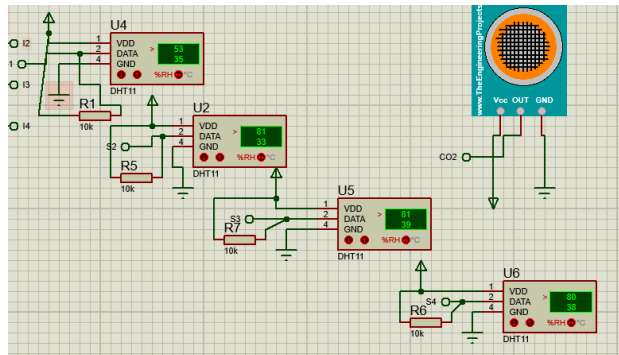


Figura 50. Conexión de sensores DHT22 en el circuito.
Fuente: Elaboración propia

3.6.6. Pantalla LCD

Para la interfaz de usuario, se integró una pantalla LCD de 20x4, es decir, 20 columnas y 4 filas, equipada con un módulo I2C que facilita la conexión a los pines SCL y SDA del Arduino [63] como se muestra en la figura 51. Esta pantalla fue seleccionada debido a su capacidad para mostrar de forma clara toda la información relevante en el arranque del sistema, incluidos parámetros como la temperatura, humedad, tiempo transcurrido y estado de las bandejas. El uso del módulo I2C simplifica el cableado y optimiza el espacio utilizado en la placa de control, permitiendo una mayor facilidad de manejo y un diseño más limpio.

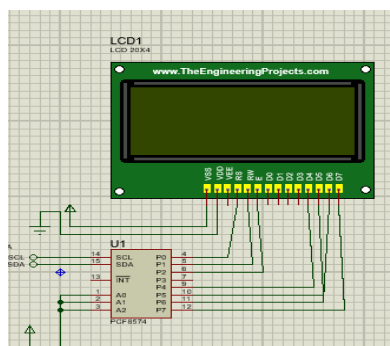


Figura 51. Pantalla LCD 20x4 integrada en el circuito
Fuente: Elaboración propia

3.6.7. Pulsadores

Se seleccionaron tres botones pulsadores con configuración pull-up, conectados a los pines 2, 3 y 4 del Arduino, como se muestra en la Figura 52. Estos botones permiten una navegación rápida y eficiente por la interfaz de usuario, facilitando el acceso a las diferentes opciones del sistema. La disposición y simplicidad de los pulsadores garantizan un control intuitivo, permitiendo al usuario desplazarse fácilmente entre menús y ajustar parámetros sin complicaciones.

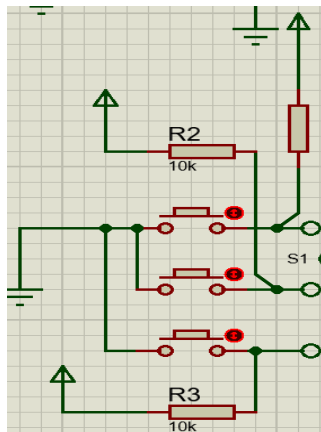


Figura 52. Botones con configuración pull-up integrados al circuito eléctrico.
Fuente: Elaboración propia.

3.6.8. Buzzer

Se seleccionó un buzzer activo, que genera los sonidos correspondientes al seleccionar y navegar por el menú. Este buzzer está conectado al pin 8 del Arduino, lo que permite que el usuario reciba retroalimentación sonora durante la interacción con la interfaz. Esta funcionalidad es esencial para mejorar la experiencia del usuario, haciendo que la navegación sea más intuitiva y confirmando cada acción realizada en el sistema, como se muestra en la figura 53.

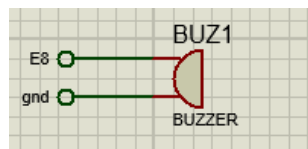


Figura 53. Integración del buzzer activo en el circuito.

Fuente: Elaboración propia

3.6.9. Control con relés y optoacopladores.

Se implementó un sistema de control mediante relés de 12V, activados por optoacopladores 4N25 para garantizar el aislamiento entre los circuitos de potencia y la lógica del Arduino, como se muestra en la figura 54. Este sistema controla varios dispositivos de 110V, como una alarma, un motor y un humidificador, los cuales son activados desde los pines 9, 13 y 22 del Arduino Mega, respectivamente. Cada relé incluye un diodo en paralelo con su bobina para proteger el transistor y otros componentes del circuito de picos de voltaje generados al momento de desconexión.

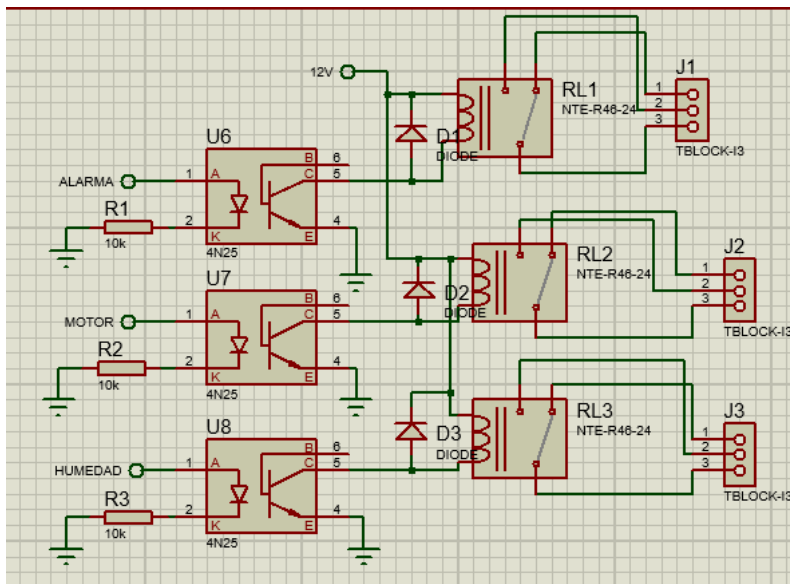


Figura 54. Sistema de control con relés y optoacopladores.

Fuente: Elaboración propia

3.6.10. Diseño PCB

Para el diseño de la Placa de Circuito Impreso (PCB) de este proyecto, se utilizó el software Proteus[64], conocido por su capacidad para simular circuitos y diseñar PCB

de manera eficiente, como se muestra en la figura 54 y 55. [64], reconocido por su capacidad para simular circuitos y diseñar PCB de manera eficiente, como se muestra en las figura 55 y 56. Este software facilitó la creación de un diseño optimizado, integrando los componentes con sus respectivos formatos PCB. Esto permitió una correcta disposición de sensores, actuadores y circuitos de potencia, asegurando que los conectores, entradas y salidas fueran accesibles para su implementación. Tras simular y verificar su funcionamiento, se procedió al diseño físico de la PCB.

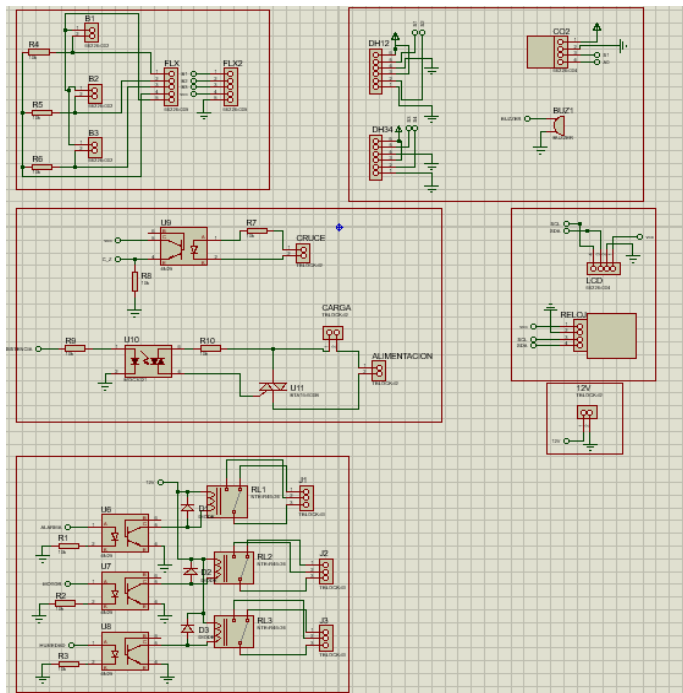


Figura 55. *diseño completo del sistema de control en proteus*
Fuente: *Elaboración propia*

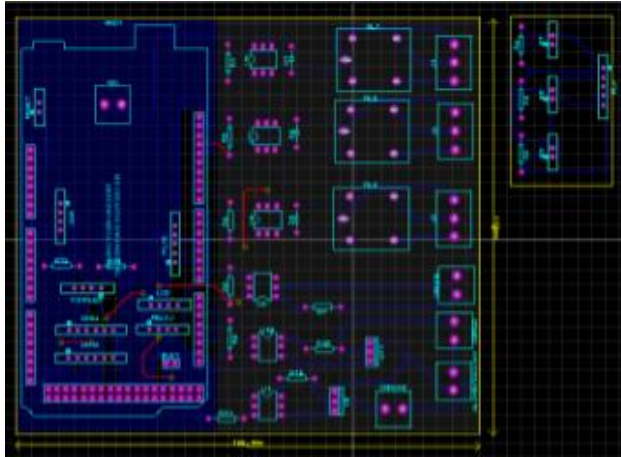


Figura 56. *Diseño conceptual de la pcb en proteus*

Fuente: Elaboración propia

3.7. Interfaz usuario máquina

En esta sección se describen las interacciones y los componentes que conforman la interfaz de usuario, ofreciendo una navegación intuitiva y eficiente a través de múltiples opciones, como se muestra en el diagrama de flujo de la interfaz (ver figura 57). El usuario tiene la capacidad de ajustar parámetros cruciales para la incubación, tales como la temperatura, la humedad, y los tiempos de incubación entre otros. Además, la interfaz incluye un sistema de menús que permite monitorear y controlar los procesos en tiempo real, optimizando las condiciones ideales para el desarrollo embrionario. El diseño se enfoca en la usabilidad y en ofrecer información clara, permitiendo al usuario gestionar los parámetros de manera sencilla.

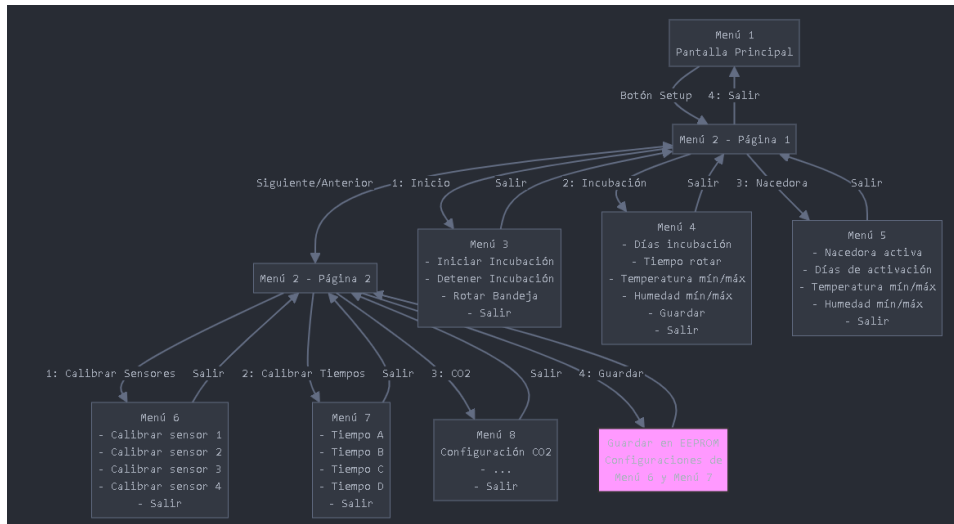


Figura 57. Diagrama de flujo de la interfaz de usuario.

Fuente: Elaboración propia

3.7.1.Descripción del Diagrama de Flujo de la Interfaz de Usuario

El diagrama de flujo mostrado en la Figura anterior describe la estructura jerárquica y la navegación dentro de la interfaz de usuario del sistema de incubación. A continuación, se detalla el funcionamiento de cada menú:

3.7.1.1 Pantalla Principal (Menú 1):

Esta es la pantalla inicial donde se muestran los parámetros esenciales en tiempo real, incluyendo el tiempo de incubación, el tiempo restante para la rotación de las bandejas, la temperatura, y la humedad dentro del habitáculo. El usuario puede acceder a los diferentes menús del sistema de navegación presionando el botón setup.

3.7.1.2 Menú de Configuración (Menú 2):

Este menú se divide en dos páginas (Página 1 y Página 2), con un total de 8 opciones. A continuación, se explican las principales funcionalidades

3.7.1.3 INICIO (Menú 3):

Iniciar Incubación: Al seleccionar esta opción, el sistema comienza a contar los días de incubación y a realizar las rotaciones de los huevos de acuerdo con los parámetros establecidos para los modos de incubación y nacedora.

Detener Incubación: Esta opción detiene todos los procesos de incubación y desactiva los parámetros previamente establecidos, incluyendo los tiempos y las condiciones tanto del modo de incubación como del modo nacedora.

Rotar Bandeja: Permite al usuario activar manualmente la rotación de las bandejas de huevos.

Salir: Regresa al Menú 2.

3.7.1.4 INCUBACIÓN (Menú 4):

Este menú permite ajustar los parámetros principales para el proceso de incubación, con las siguientes opciones:

- ❖ **Días de Incubación:** Ajusta la duración total del proceso de incubación en días.
- ❖ **Rotación de Bandeja:** Define cada cuántas horas se activará la rotación automática de las bandejas.
- ❖ **Temperatura Mínima:** Establece el valor mínimo de temperatura para el control de encendido/apagado por histéresis.
- ❖ **Temperatura Máxima:** Define el valor máximo de temperatura en el rango de control por histéresis.
- ❖ **Humedad Mínima:** Ajusta el valor mínimo de humedad para el control de encendido/apagado por histéresis.
- ❖ **Humedad Máxima:** Establece el valor máximo de humedad en el rango de control por histéresis.

- ❖ **Guardar (G):** Guarda los parámetros configurados en este menú en la EEPROM, asegurando que se mantengan en la memoria del sistema Arduino.
- ❖ **Salir (S):** Permite salir de este menú y regresar al Menú 3.

3.7.1.5 NACEDORA (Menú 5):

Este menú es similar al Menú 4, pero con la diferencia de que la rotación de las bandejas se desactiva en este modo. Incluye la opción de activar o desactivar la nacedora y ajustar los mismos parámetros de temperatura y humedad que en el modo de incubación.

3.7.1.6 CALIBRAR SENSORES (Menú 6):

Permite calibrar los cuatro sensores DHT22 utilizados para la medición de temperatura y humedad, ajustando sus lecturas respecto a una referencia. El usuario puede sumar o restar grados en decimales a las lecturas de cada sensor y visualizar en tiempo real tanto las lecturas calibradas como las originales, junto con el valor de la corrección aplicada. Para salir de este menú y regresar al Menú 3, es necesario navegar hacia arriba fuera del rango visible en la pantalla LCD.

3.7.1.7 CALIBRAR BANDEJA (Menú 7):

Este menú permite ajustar los tiempos de rotación de las bandejas para asegurar que alcancen un ángulo de 45 grados. Hay cuatro tiempos disponibles:

- ❖ **Tiempo A:** Rotación de 0 grados a 45 grados.
 - ❖ **Tiempo B:** Retorno de 45 grados a 0 grados.
 - ❖ **Tiempo C:** Rotación de 0 grados a -45 grados.
 - ❖ **Tiempo D:** Retorno de -45 grados a 0 grados. Estos ajustes permiten calibrar el motor para detener la bandeja en los ángulos deseados.
-
- ❖ **CO2 (Menú 8):**
Muestra los niveles de dióxido de carbono (CO2) y otros gases presentes en el ambiente de incubación.

3.7.1.8 GUARDAR:

Esta opción permite guardar los parámetros de calibración de sensores y tiempos de incubación configurados en los Menús 6 y 7 en la EEPROM, de manera que se conserven en la memoria del sistema Arduino.

3.8. Implementación física del sistema

3.8.1. Implementación Mecánica

Tras completar el diseño y análisis del sistema en software especializado, se procedió con el montaje físico, evaluando los materiales previamente mencionados y empleando maquinaria especializada, como soldador, taladro, caladora, pulidora, cortadora láser e impresora 3D, entre otros equipos.

3.8.1.1 Estructura metálica

En la primera etapa, se fabricó el soporte de la incubadora utilizando ángulos de 1 pulgada, asegurando una base resistente para la estructura. Para ello, se emplearon dos ángulos de 6 metros cada uno, sumando un total de 12 metros de material. Posteriormente, se realizó el corte a las dimensiones requeridas con herramientas adecuadas para garantizar precisión en las uniones. Finalmente, se llevó a cabo la soldadura de la estructura, asegurando una correcta fijación de las piezas, como se muestra en las figuras 58 y 59.



Figura 58. Pulido de la estructura metálica del sistema de incubación.
Fuente: Elaboración propia

Comentado [JM39]: Indicar localización y nombre/referencia de los equipos usados

Comentado [JM40]: Unir las dos figuras en una sola y etiquetarlas como (a) y (b)...hacer esto para figuras semejantes

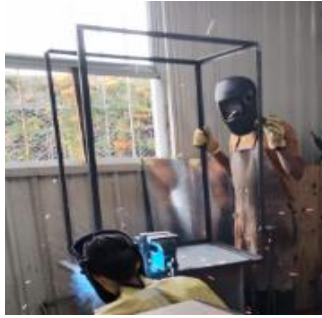


Figura 59. Soldado de la estructura metálica del sistema de incubación.

Fuente: Elaboración propia

3.8.1.2 Cajón fabricado en tablero de densidad media (MDF)

Comentado [JM41]: Buscar una palabra mas técnica!

Para la fabricación del cajón, se utilizaron tableros de MDF cortados con una cortadora láser, lo que permitió obtener cortes precisos y facilitar su posterior ensamblaje. Las piezas se unieron en las esquinas mediante pegamento especializado para MDF, como se muestra en la figura 60, otorgándole mayor resistencia y estabilidad al conjunto. Finalmente, el cajón se acopló a la parte externa de la estructura con tornillos punta broca, proporcionando un soporte adicional y mejorando su resistencia, como se observa en la figura 61.

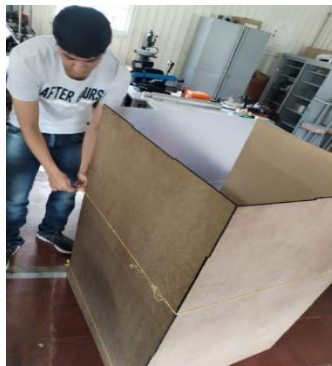


Figura 60. Cajón de MDF del sistema de incubación.

Fuente: Elaboración propia



Figura 61. Ensamble de la estructura con el cajón de MDF unido con tornillos.

Fuente: Elaboración propia

3.8.1.3 Aislamiento térmico (poliestireno expandido y Thermolon)

Una vez acoplado el cajón a la estructura, se procedió a instalar las capas de aislamiento térmico para mejorar la retención del calor. Cada pared fue forrada con una capa de poliestireno expandido de 1 cm de espesor, la cual se adhirió a las láminas de MDF utilizando colbón especial para MDF. Posteriormente, se agregó una lámina de Thermolon de 3 mm y una capa adicional de MDF de 5 mm ver en la figura 62, que cubrió el poliestireno expandido desde la parte interna. Esta composición resultó en una estructura con mayor aislamiento térmico y resistencia. Finalmente, la superficie de MDF fue recubierta con una última capa de Thermolon y se fijaron todas las capas tipo sándwich a la estructura metálica mediante tornillos (figura 63), lo que aseguró un ensamblaje firme y robusto.



Figura 62. Recubriendo la estructura con el poliestireno expandido.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 63. Ensamble tipo sándwich asegurado con tornillo y sellado con pegamento.

Fuente: Elaboración propia

3.8.1.4 Sistema de ventilación

Para el sistema de ventilación, se utilizó el diseño modelado y ensamblado en SolidWorks, el cual fue cortado en MDF (Medium Density Fiberboard) de 5 mm mediante una cortadora láser. Posteriormente, se aplicó sellante para MDF para mejorar su resistencia y durabilidad, seguido de una capa de esmalte y, finalmente, una capa de laca blanca para optimizar sus propiedades impermeables. En la figura 64 se puede observar el diseño final del soporte de los ventiladores.



Comentado [JM42]: Colocar esto la primera vez que aparezca la sigla MDF

Comentado [JM43]: Ya han dicho, pegamento, colbón, sellante, unificar conceptos

Figura 64. Diseño final de los soportes para los ventiladores.

Fuente: Elaboración propia

Para la fabricación de la media luna, se utilizó una lámina de policarbonato, material elegido por su flexibilidad y facilidad de manejo. Para mejorar su resistencia y aislamiento térmico, se cubrió en una de sus caras con Thermolon de 3 mm. Finalmente, la estructura se fijó al cajón de la incubadora mediante tornillos, asegurando un acople firme y estable.

Para el canal de aire, se utilizó un panel LED rectangular con marco de aluminio, el cual fue fijado a la base de hierro para garantizar su estabilidad. Posteriormente, se cerró con una lámina de aluminio de 1 mm de espesor, que fue tratada con pintura esmalte y una capa de laca para mejorar su resistencia y durabilidad. Esta estructura permitió que el canal de aire permaneciera firme y estable, asegurando una distribución eficiente del flujo de aire dentro de la incubadora, como se muestra en la figura 65.



Figura 65. Ensamble total del sistema de ventilación dentro de la incubadora.

Fuente: Elaboración propia

3.8.1.5 Puerta de acceso al sistema de incubación

Para la puerta de la incubadora, se utilizó un marco de tubo de hierro de 1.5 pulgadas, el cual fue soldado (ver figura 66) y pintado con esmalte blanco y laca para prevenir la corrosión. Para mejorar el aislamiento térmico, el interior del marco fue relleno con poliestireno expandido (ver figura 67) y cubierto con dos capas de MDF de 5 mm en

un lado y tres en el otro, formando una estructura tipo sándwich. Finalmente, todas las capas fueron aseguradas con tornillos al tubo, lo que resultó en una puerta rígida, firme y resistente.



Figura 66. Soldando la estructura metálica de la puerta para el sistema de incubación.

Fuente: Elaboración propia



Figura 67. Rellenado de poliestireno expandido de 1m de grosor la estructura metálica.

Fuente: Elaboración propia

La ventanilla fue adherida al MDF por la parte interior en ambas caras, dejando un espacio de aire entre ellas, como se observa en la figura 68.



Figura 68. Ventanilla de la puerta para la visualización del proceso de incubación
Fuente: *Elaboración propia*

La puerta se fijó de manera segura a la estructura de la incubadora mediante dos bisagras. Estas se unieron al marco de tubo de hierro de la puerta y a la estructura principal de la incubadora utilizando tornillos, lo que garantiza una sujeción lo suficientemente firme y resistente para soportar el peso y el uso de la puerta, como se muestra en la figura 69.



Figura 69. Bisagras ubicadas estratégicamente entre la puerta y la incubadora.
Fuente: *Elaboración propia*

Finalmente, se instalaron cuatro ruedas con freno en la incubadora para facilitar su transporte. Se colocó una rueda en cada esquina de la base, asegurándolas con tornillos a la estructura para garantizar estabilidad y movilidad. Como se muestra en la figura 70, este diseño permite desplazar la incubadora con facilidad y fijarla en una posición estable cuando sea necesario.



Figura 70. Rueda utilizada en la incubadora automatizada.

Fuente: Elaboración propia

3.8.1.6 Sistema de volteo de huevos

La estructura de soporte de las bandejas de huevos fue construida con tubo de hierro de una pulgada de diámetro, el cual fue soldado y perforado para la inserción de tornillos pasantes que permiten fijar las bandejas. Para su protección y durabilidad, se aplicó un tratamiento con pintura anticorrosiva blanca y una capa de esmalte blanco, mejorando su resistencia a la humedad y al desgaste.



Figura 71. Sistema de volteo de huevos acoplado con las bandejas hechas en acrílico.
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, para las bandejas que sostienen los huevos se utilizó acrílico de 3 mm de espesor, el cual fue cortado con una cortadora láser para lograr cortes precisos en cada orificio donde se ubican los huevos. Este proceso permitió fabricar bandejas con capacidad para 36 huevos, garantizando una disposición uniforme y estable como se muestra en la figura 71.

De igual manera, para las bandejas que soportan los huevos se utilizó acero galvanizado de $\frac{3}{4}$ de pulgada x 2.44 m, el cual fue cortado y remachado en cada unión, asegurando una estructura resistente y estable. Una vez ensambladas, las bandejas quedaron listas para acoplarse a la estructura de la incubadora, como se muestra en la figura 72.



Figura 72. Sistema de volteo ensamblado la estructura y soporte de las bandejas.

Fuente: Elaboración propia

Para permitir el movimiento de las bandejas, se utilizaron tornillos pasantes con tuerca, asegurando un movimiento rotacional con respecto a la estructura. Además, las bandejas montadas se unieron a la estructura mediante dos láminas de aluminio, cuya ligereza minimiza el esfuerzo durante el volteo. Con estos elementos ensamblados, el sistema de volteo quedó finalizado, como se muestra en la figura 73.



Figura 73. Tornillos pasantes empleados para asegurar las bandejas al soporte.

Fuente: Elaboración propia

Para el accionamiento rotatorio de las bandejas se implementó un sistema de transmisión por piñón-cadena (ver figura 74), permitiendo un control preciso del ángulo de inclinación, el cual oscila en $\pm 45^\circ$. El sistema es impulsado por un motorreductor de

Comentado [JM44]: Esto esta errado? Debe ser $45^\circ \pm X^\circ$

corriente continua de 12V con una velocidad nominal de 5 RPM, garantizando un movimiento controlado y uniforme.



Figura 74. Sistema piñón cadena utilizado para el volteo de los huevos a 45°.

Fuente: Elaboración Propia

3.8.1.7 Caja de control

Se diseñó una caja de control fabricada en MDF de 5 mm de grosor, con dimensiones de 20 × 14 × 10 cm, otorgándole una apariencia compacta y funcional. En su interior se integra la placa de control, la fuente de alimentación y un ventilador, cuya función es disipar el calor generado por los dispositivos electrónicos para garantizar su correcto funcionamiento.

En la parte frontal, la caja cuenta con una pantalla LCD que permite visualizar en tiempo real los parámetros de incubación, así como tres botones de control para la configuración y ajuste del sistema. Además, en la parte trasera se incorporó un orificio rectangular diseñado para el paso del cableado que conectó la caja de control con la incubadora, lo que facilitó una instalación ordenada y segura. A continuación, se presenta en la figura 75.



Figura 75. Diseño en físico de la caja de control.

Fuente: Elaboración propia

3.8.2.Implementación Electrónica

Placa de circuito impreso (PCB)

Una vez finalizado el diseño de la PCB, se procedió a imprimir las pistas utilizando una máquina de prototipado, la cual realizó el grabado en doble capa con alta precisión. Como se muestra en la figura 76, este proceso permitió obtener un circuito bien definido y optimizado para la integración de los componentes electrónicos.

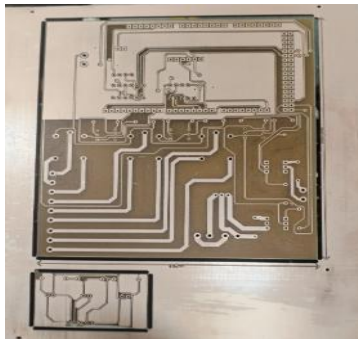


Figura 76. Diseño de pcb en físico.

Fuente: Elaboración propia

Con la placa terminada, se ensamblaron los componentes en sus respectivas posiciones de forma ordenada, utilizando un microscopio de soldar para mayor precisión. Con la ayuda de una estación de soldar junto con el cautín y estaño, se logró un acabado profesional en la soldadura, asegurando una correcta conexión y funcionamiento de la PCB como se muestra en la figura 77.

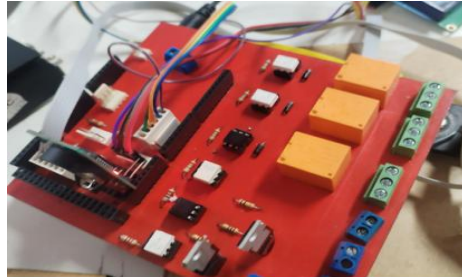


Figura 77. Pcb con todos los componentes integrados
Fuente: Elaboración propia

3.9. Control de variables

El control de variables en un proceso de incubación es fundamental para garantizar el desarrollo óptimo del embrión dentro del huevo. Entre los parámetros más críticos se encuentran la temperatura, que debe mantenerse entre 37.5°C y 38°C [65] mediante resistencias calefactoras y sensores precisos, y la humedad relativa, que oscila entre 50%-60% durante la incubación y 65%-75% en la fase de eclosión, regulada con humidificadores. Además, el flujo de aire es esencial para distribuir uniformemente el calor y el oxígeno dentro de la incubadora, evitando zonas con temperaturas desiguales.

Otro factor clave es el volteo de los huevos, el cual se realiza mediante un mecanismo motorizado que inclina los huevos entre +45° y -45° [66] cada 3 horas, evitando que el embrión se adhiera a la cáscara. Este proceso se mantiene hasta el día 18 de incubación, momento en el cual se suspende para la fase de eclosión. Todo el sistema es gestionado por una tarjeta Arduino que regula la activación de calefactores, ventiladores, humidificadores y motores en función de los datos recibidos de sensores de temperatura, humedad y posición, asegurando condiciones óptimas para maximizar la tasa de éxito en la incubación.

3.9.1. Control en el sistema de volteo

El sistema de volteo de bandejas sigue una secuencia de cuatro estados operacionales, asegurando un movimiento cíclico controlado para garantizar la

correcta incubación de los huevos. El control del sistema está programado para realizar volteos a intervalos regulares, con inversión de giro mediante un circuito de relés, y cuenta con un mecanismo de seguridad basado en finales de carrera para evitar sobrepasos en la inclinación.

3.9.1.1 Estados del sistema

1. **Estado 1 Posición neutra (0°):** En este estado inicial, las bandejas se encuentran completamente horizontales, sin inclinación. Aquí, el sistema permanece inactivo hasta que transcurren 3 horas, momento en el cual se activa el motorreductor.
2. **Estado 2 Inclinación positiva (+45°):** Al completarse el tiempo de espera, el sistema energiza el motorreductor de 12V a 5 RPM, que acciona el mecanismo de piñón-cadena, generando el movimiento de las bandejas en sentido horario hasta alcanzar una inclinación de +45°. Para evitar que el motor sobrepase este ángulo, se establece un tiempo de activación de 3 segundos, garantizando un desplazamiento preciso. Además, se implementa un final de carrera de emergencia, el cual interrumpe la alimentación del motor en caso de que el sistema falle o se detecte una inclinación superior a la programada. Sin embargo, el sistema de control sigue operativo y listo para continuar con la siguiente fase del ciclo.
3. **Estado 3 Retorno a posición neutra (0°):** Transcurridas otras 3 horas, el sistema invierte la polaridad del motor mediante los relés de inversión de giro, haciendo que las bandejas regresen gradualmente a la posición de 0° mediante un desplazamiento en sentido antihorario.
4. **Estado 4 Inclinación negativa (-45°):** Luego de otras 3 horas, el sistema activa nuevamente el motor en sentido antihorario, inclinando las bandejas a -45°. Este movimiento sigue las mismas condiciones de seguridad que el Estado 2, asegurando precisión y control en el desplazamiento.

Finalmente, tras 3 horas adicionales, el motor vuelve a activarse en sentido horario, retornando las bandejas a 0° (Estado 1) y completando así un ciclo completo de volteo en 12 horas.

3.9.1.2 Frecuencia y duración del volteo

Cada ciclo de cuatro estados tiene una duración total de 12 horas, lo que implica que en un día completo (24 horas) el sistema realiza dos ciclos completos, equivalentes a 8 volteos de las bandejas. Este proceso es fundamental para evitar que los embriones se adhieran a la cáscara, asegurando su correcto desarrollo.

Durante los 18 días de incubación en los que se requiere el volteo de los huevos, el sistema ejecuta 2 ciclos diarios $\times$ 18 días = 36 ciclos completos, lo que equivale a 144 cambios de inclinación.

3.9.1.3 Consideraciones técnicas adicionales

- **Mecanismo de transmisión:** La conversión del movimiento rotatorio del motor al sistema de bandejas se realiza mediante un acoplamiento piñón-cadena, garantizando un movimiento uniforme y sincronizado.
- **Programación del control:** La activación y desactivación del motor, así como la inversión de giro, están gestionadas por un microcontrolador, con tiempos predefinidos y un sistema de seguridad para prevenir fallas mecánicas o electrónicas.

3.9.2. Control on-off de temperatura y humedad por histéresis

Para el control de temperatura y humedad se empleó un sistema ON/OFF por histéresis, cuyo rango puede ser ajustado desde el menú de la incubadora. Durante las pruebas realizadas con distintos valores, se observó que el mejor desempeño se lograba al dejar el rango de histéresis en cero, ya que permitía mantener la temperatura dentro de un margen de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ la mayor parte del tiempo, lo que representa una desviación mínima y poco significativa. Además, en ningún momento se superó el umbral de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ respecto al valor objetivo, un rango perfectamente válido para

incubar huevos. Esta estabilidad en el control hizo innecesaria la implementación de un sistema más complejo como un PID, ya que, aunque este puede ofrecer un ajuste más fino, no resultaba indispensable en este caso, dado que los cambios de temperatura y humedad en una incubadora suelen ser lentos y predecibles. Por tanto, el control ON/OFF demostró ser más que adecuado, fácil de implementar, económico y suficientemente preciso para este tipo de aplicación. Además, en la figura 78 se presenta el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del sistema, incluyendo el control de temperatura, humedad y los tiempos de rotación de las bandejas.

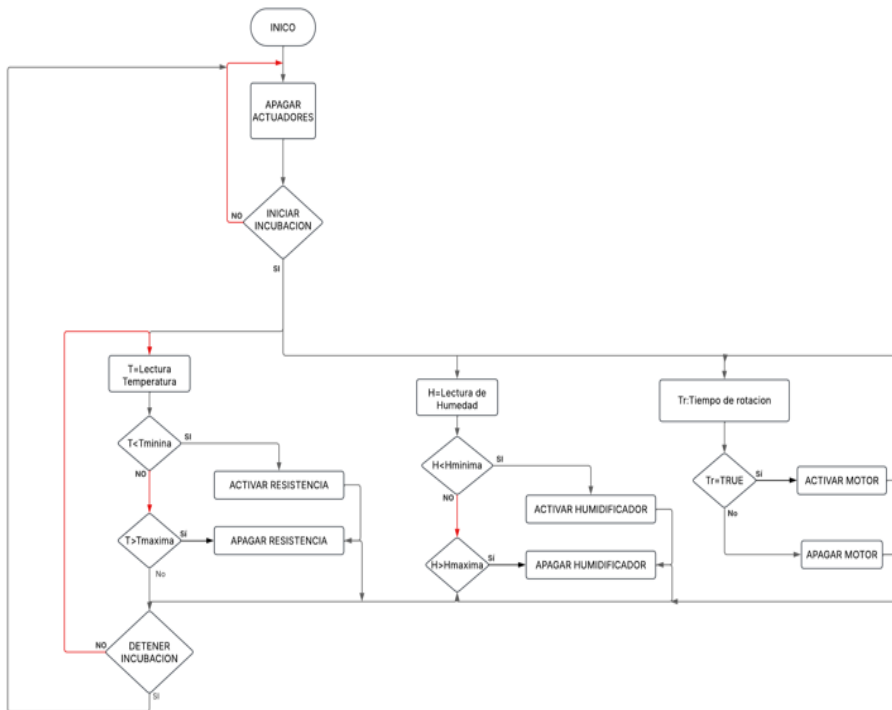


Figura 78. Diagrama de flujo del control on-off con histéresis.

Fuente: Elaboración propia

Al iniciar el sistema de la incubadora, todos los actuadores permanecen apagados hasta que el usuario inicie el proceso de incubación desde la interfaz. Una vez

activado, el sistema evalúa en paralelo el control de temperatura, humedad y rotación.
Ubicación de la incubadora durante el proceso de incubación de huevos.

Comentado [JM45]: ¿?

Para el control de temperatura, el controlador toma la lectura de los cuatro sensores DHT22, promediando sus mediciones. Si la temperatura promedio es inferior al límite mínimo del rango de histéresis, la resistencia calefactora se activa. Una vez que la temperatura supera el límite máximo de la histéresis, la resistencia se apaga. Este ciclo se repite continuamente para mantener la temperatura dentro del rango establecido como se muestra en la figura 79.

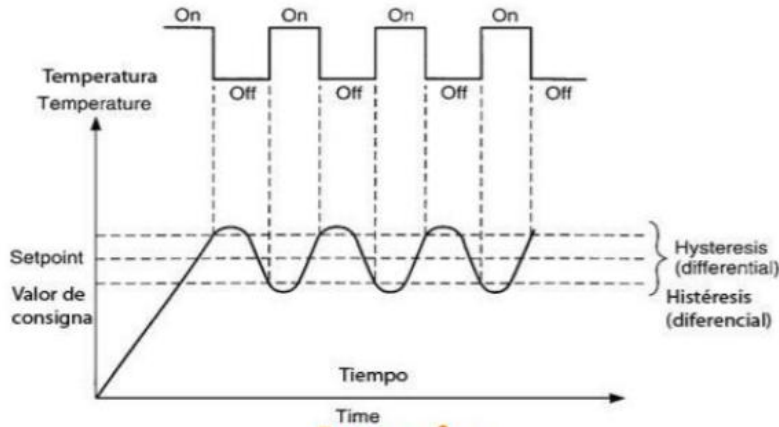


Figura 79. Diagrama de Control On-Off con Histéresis
Fuente:[67]

De manera similar, el control de humedad sigue el mismo principio. El sistema evalúa la humedad censada por los DHT22 y, si el valor está por debajo del límite mínimo de la banda de histéresis, activa el humidificador. Cuando la humedad alcanza el límite máximo, el humidificador se apaga, repitiendo este ciclo según sea necesario para mantener la humedad dentro del rango deseado.

Asimismo, el tiempo de rotación de las bandejas es controlado por un contador regresivo, el cual puede ser ajustado desde la interfaz de usuario, permitiendo definir cada cuántas horas se desea realizar la rotación.

Una vez iniciado el conteo, el temporizador disminuye progresivamente hasta llegar a cero, momento en el cual se activa el motor por el tiempo de volteo previamente configurado en la interfaz. Al finalizar este tiempo, el motor se apaga automáticamente y el contador se reinicia, iniciando un nuevo ciclo de cuenta regresiva hasta la siguiente rotación.

Finalmente, el usuario tiene la opción de detener la incubación en cualquier momento. Si la incubación es detenida desde la interfaz, el sistema retorna al estado inicial, apagando todos los actuadores y deteniendo los procesos de control.

CAPITULO 4

Validación del sistema de incubación

4.1. Descripción del Proceso de Validación

La validación del sistema tiene como objetivo principal demostrar que, bajo condiciones controladas, el dispositivo diseñado cumple con los parámetros técnicos y ambientales necesarios para mantener un entorno de incubación óptimo. Esto implica asegurar la estabilidad de variables críticas como la temperatura, la humedad relativa, la ventilación y el sistema de volteo automático de los huevos, todos [estos](#) factores determinantes en el adecuado desarrollo embrionario.

Este proceso de validación permite comprobar que el sistema no solo funciona correctamente desde el punto de vista técnico, sino que también cumple con los [requisitos biológicos mínimos para favorecer la eclosión exitosa](#). Para garantizar una evaluación objetiva, se establecieron los siguientes aspectos clave que fueron monitoreados y verificados durante las pruebas experimentales.

Comentado [JM46]: ¿?

4.1.1. Variables a Evaluar

La temperatura objetivo durante el proceso de incubación fue de $37.5^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Para su medición, se emplearon cuatro sensores DHT22 distribuidos estratégicamente en cada una de las bandejas, tal como se ilustra en la Figura 80. Con el fin de obtener

una lectura representativa y precisa, se consideró el promedio de las temperaturas registradas por estos sensores.



Figura 80. Ubicación de los sensores en cada bandeja

Fuente: Elaboración propia

Durante el proceso de incubación, el valor objetivo de humedad relativa se estableció en $55\% \pm 5\%$, mientras que en la fase de pre-eclosión se incrementó a $75\% \pm 5\%$. Para la medición de este parámetro, se utilizaron cuatro sensores DHT22 ubicados en cada una de las bandejas, como se muestra en la Figura 80. Con el propósito de obtener una evaluación precisa de la humedad relativa dentro de la incubadora, se calculó el promedio de las lecturas registradas por dichos sensores.

Comentado [JM47]: Como está aquí parece que fueran diferentes sensores, pero es el mismo que mide las dos variables. Redactar mejor para mayor claridad

Para garantizar la adecuada renovación del aire y una distribución homogénea de la temperatura y la humedad en el interior de la incubadora, se implementó un sistema de ventilación con flujo de aire constante. La evaluación de su desempeño se realizó mediante el monitoreo de la temperatura en cada bandeja utilizando sensores DHT22, complementado con sensores externos que permitieron verificar la distribución térmica dentro del habitáculo, tal como se observa en la Figura 81.



Figura 81. Medición de la temperatura en el interior de la incubadora con multímetros
Fuente: Elaboración propia

La correcta circulación del aire se evaluó verificando la entrada a través de los orificios de ventilación mediante pruebas de succión de aire y la salida a través del sistema de extracción, como se ilustra en la Figura 82.

Comentado [JM48]: Describir mejor



Figura 82. Verificación de renovación de aire dentro de la incubadora
Fuente: Elaboración propia

El volteo periódico de los huevos durante la incubación es fundamental para obtener buenos niveles de nacimientos y garantizar la calidad del pollito. Factores como el ángulo y la frecuencia del volteo son críticos, por lo que el mecanismo debe operar con un movimiento suave y continuo, evitando caídas bruscas. En este caso, se programaron ocho rotaciones diarias, cada una con un ángulo aproximado de 45° , retornando a la posición horizontal (0°) al finalizar cada ciclo. La verificación del correcto funcionamiento del sistema de volteo se realizó mediante inspección visual a través de la ventanilla de la incubadora, comprobando que las bandejas alcanzaran los topes de 45° y regresaran a 0° , tal como se muestra en la Figura 83.

Comentado [JM49]: Esta imagen no es representativa



Figura 83. Verificación del Angulo dentro del sistema de incubación a través de la ventanilla

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Condiciones Experimentales

4.1.2.1 Número de Huevos:

Para este estudio, se seleccionaron 59 huevos de gallina criolla, recolectados en una granja avícola de la ciudad de Popayán. Dado que la disponibilidad de granjas especializadas en la producción de huevos fértiles para incubación en zona es limitada. Por tanto, se optó por una granja ubicada en el barrio las Guacas de la ciudad de Popayán que, aunque no se dedica específicamente a este fin, mantiene condiciones que pueden favorecer la fertilidad de los huevos. Esta elección busca maximizar la tasa de eclosión al asegurar la presencia de embriones viables. Los huevos se distribuyeron de manera homogénea en cada bandeja de la incubadora para obtener una muestra representativa, tal como se ilustra en la Figura 84.



Figura 84. Distribución de los huevos en las bandejas: 15 en las tres primeras bandejas y 14 en la última.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2.2 Duración del Proceso:

Inicialmente, se tenía previsto realizar el proceso de validación en una granja avícola del departamento del Cauca, con el fin de contar con condiciones más representativas del entorno productivo real. Sin embargo, debido a factores logísticos y de disponibilidad, la validación se llevó a cabo en una residencia ubicada en el barrio Pinares de la Variante, en el municipio de Popayán. Este lugar fue seleccionado porque contaba con condiciones óptimas para el proceso de incubación, tales como un espacio cerrado, controlado y libre de corrientes de aire, además de una disponibilidad eléctrica estable y facilidad para el monitoreo constante del sistema. Durante este proceso, se operó la incubadora a lo largo de un ciclo completo de incubación, con una duración aproximada de 21 días, como se muestra en la figura 85

Comentado [JM50]: Esta imagen no es representativa



Figura 85. Ubicación de la incubadora durante el proceso de incubación
Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.3 Configuración Inicial y Calibración

Previo al inicio del proceso de validación, se realizó una calibración exhaustiva de todos los sensores y actuadores involucrados en el sistema, incluyendo los módulos de calefacción, humidificación, ventilación y el mecanismo de rotación de los huevos. Esta etapa fue fundamental para garantizar que las mediciones registradas y las acciones ejecutadas por el sistema fueran precisas y confiables, minimizando así cualquier margen de error que pudiera haber afectado los resultados experimentales. Durante la calibración, se ajustaron todos los componentes a los rangos de operación previamente definidos, asegurando que respondieran adecuadamente a las condiciones ambientales necesarias para una incubación eficiente. Asimismo, se verificó que los sensores de temperatura y humedad entregaran lecturas consistentes con instrumentos de referencia, y que los actuadores respondieran de manera oportuna y controlada ante las señales emitidas por el sistema de control. De este modo, se estableció una base técnica sólida que permitió llevar a cabo una validación rigurosa del desempeño del dispositivo.

4.1.2.4 Calibrar Temperatura

Comentado [JM51]: Mejorar redacción

Antes de iniciar el proceso de incubación, es fundamental calibrar los sensores DHT22 para asegurar la precisión en las lecturas de temperatura. Aunque estos sensores vienen calibrados de fábrica, pueden presentar pequeñas variaciones entre unidades. Para este proceso, se utiliza un termómetro externo de alta precisión como referencia. La calibración se realiza a través del menú de usuario para cada sensor DHT22, permitiendo ajustar individualmente las lecturas. En la Figura 86 se muestra la interfaz de calibración, donde se presentan:

Comentado [JM52]: Marca/referencia del termómetro



Figura 86. Calibración de los sensores DHT22 en la interfaz de usuario

Fuente: Elaboración Propia

- ❖ **Temperatura sin calibrar:** Lectura inicial de cada sensor.
- ❖ **Factor de calibración:** Valor que se suma o resta para alinear la lectura del sensor con la referencia.
- ❖ **Temperatura calibrada:** Lectura ajustada tras aplicar el factor de calibración.

4.1.2.5 Calibración de Humedad:

Antes de iniciar la incubación, es esencial calibrar los sensores DHT22 para garantizar lecturas precisas de humedad. Aunque estos sensores vienen calibrados de fábrica, pueden presentar pequeñas variaciones entre unidades. Para este proceso, se utiliza un higrómetro externo de alta precisión como referencia. La calibración se realiza a través del menú de usuario para cada sensor DHT22, permitiendo ajustar individualmente las lecturas. En la Figura 87 se muestra la interfaz de calibración, donde se presentan:

Comentado [JM53]: Texto repetido, podrían unir las dos secciones si el proceso es el mismo

Comentado [JM54]: Marca/referencia



Figura 87. Interfaz de Calibración de Humedad

Fuente: Elaboración Propia

- ❖ **Humedad sin calibrar:** Lectura inicial de cada sensor.
- ❖ **Factor de calibración:** Valor que se suma o resta para alinear la lectura del sensor con la referencia.
- ❖ **Humedad calibrada:** Lectura ajustada tras aplicar el factor de calibración.

Este procedimiento garantiza que las mediciones de temperatura y humedad sean consistentes y precisas durante todo el proceso de incubación.

4.1.2.6 Calibración de las Bandejas de Rotación:

Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de volteo, se inició con la alineación de las bandejas utilizando un nivel de burbuja, el cual se colocó sobre cada una para verificar que estuvieran perfectamente horizontales (0 grados). En caso de detectar desviaciones, se realizaron los ajustes necesarios en el mecanismo de soporte. Posteriormente, se procedió con la calibración del tiempo de rotación. Para ello, se accedió al menú de configuración de la incubadora, donde se ajustaron los parámetros correspondientes. Desde la posición vertical (0 grados), se activó el motor y se cronometró el tiempo que tardaba la bandeja en alcanzar un ángulo de 45 grados, determinando así el tiempo que el motor debía permanecer activo para alcanzar el ángulo deseado. Además, se programaron cuatro intervalos de tiempo que correspondían a las distintas posiciones que adoptaba la bandeja durante un ciclo completo de rotación. Esta calibración precisa del mecanismo de rotación fue fundamental para asegurar que los huevos se voltearan de manera uniforme y

constante, evitando problemas como la adhesión del embrión a la cáscara y promoviendo una incubación más favorable.

4.2. Resultados de la Validación

4.2.1. Presentación de Datos

Para la recolección de datos se utilizó el TeamColer, un software encargado de almacenar los registros de temperatura y humedad generados cada segundo. Los datos fueron recolectados desde el momento en que se inició el sistema, lo que permitió observar el comportamiento térmico a lo largo del tiempo, incluyendo la variación de la temperatura durante el proceso de calentamiento hasta alcanzar el estado estable o Setpoint.

Evolución de la Temperatura hasta alcanzar el estado estable

La Figura 88 muestra la evolución de la temperatura en su fase inicial hasta alcanzar el Setpoint de 37.5°C, donde finalmente se estabiliza en aproximadamente 4700 segundos. En los datos se evidencian picos de temperatura muy breves, de aproximadamente 1 segundo, en los cuales la temperatura medida por el sensor alcanza picos de hasta 38°C. Sin embargo, al tratarse de ruido del sensor y debido a su corta duración de alrededor de 1 segundo, estos picos no afectan en ningún sentido la temperatura de referencia.

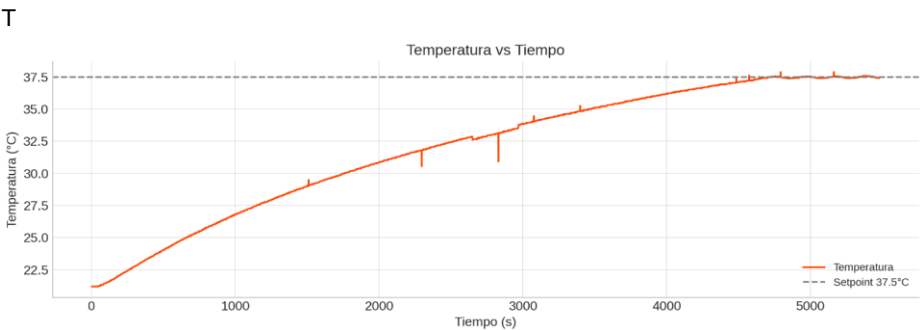


Figura 88. Cambio de Temperatura En función del tiempo

Fuente: Elaboración propia

Con los datos recolectados se realizó un análisis para determinar el error o variación en las lecturas de los sensores con respecto al valor de referencia (Setpoint) como [se](#) muestra en la tabla 3. Este análisis permitió evaluar la precisión del sistema de control térmico y cuantificar qué tanto se desviaron las mediciones del objetivo establecido.

Para efectos de cálculo y procesamiento de los datos, se utilizó el lenguaje de programación Python, que permitió automatizar el análisis estadístico y obtener métricas como el error promedio, el error absoluto medio (MAE), el error cuadrático medio (RMSE) y las desviaciones extremas.

Tabla 3. Métricas de error de control de temperatura en incubadora

Métrica	Valor	Interpretación
Error promedio	-0.015 °C	En promedio, la temperatura está apenas 0.015 °C por debajo del Setpoint, lo que indica un control preciso.
Error absoluto medio	0.050 °C	En términos absolutos, la temperatura se desvía en promedio solo 0.05 °C, lo que está muy por debajo de los márgenes aceptables en los procesos de incubación.
Error cuadrático medio (RMSE)	0.062 °C	Penalizando los errores grandes, el RMSE también es bajo, lo que sugiere una excelente estabilidad y bajo ruido en el sistema.
Máximo error	0.400 °C	La mayor desviación positiva fue de +0.4 °C, dentro de los límites aceptables para incubación ($< \pm 0.5$ °C).
Mínimo error	-0.120 °C	La mayor desviación negativa fue de -0.12 °C, también dentro del margen seguro.

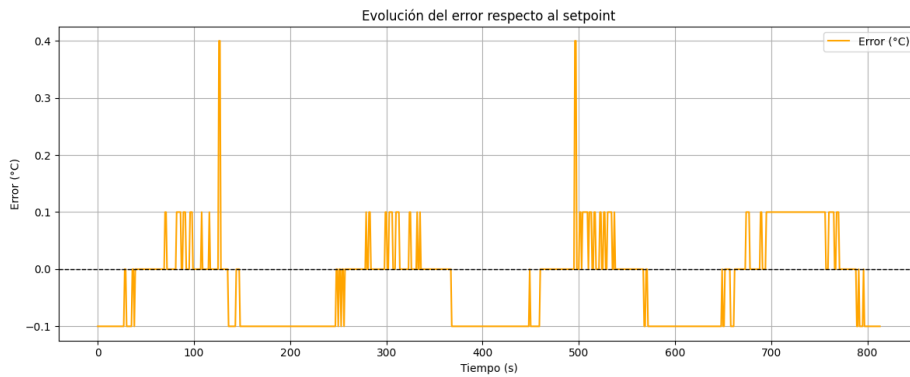


Figura 89. Evolución del error respecto al Setpoint.
Fuente: Elaboración propia

La figura 89 muestra que el sistema térmico de la incubadora mantiene la temperatura con una alta estabilidad, con errores en su mayoría contenidos entre -0.1°C y $+0.1^{\circ}\text{C}$ respecto al Setpoint de 37.5°C . Se observaron algunos picos aislados de hasta $+0.4^{\circ}\text{C}$, los cuales no afectan significativamente el comportamiento general del sistema. Este desempeño indica que el sistema es adecuado y su comportamiento puede extrapolarse a los días siguientes, ya que demostró ser estable y consistente en todo el periodo de observación. En ningún momento se presentó una salida abrupta del Setpoint, lo cual fue verificado tanto visualmente como por la ausencia de activaciones de la alarma, la cual está configurada para dispararse ante desviaciones mayores a $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, como es recomendado en aplicaciones de incubación que requieren un control térmico preciso.

Variación de la Humedad Durante el Proceso de Incubación

Se inicia graficando los datos de humedad desde los valores correspondientes a la humedad ambiente hasta alcanzar el Setpoint de 55 % de humedad relativa, donde finalmente el sistema logra estabilizarse, donde se muestra la evolución del error de humedad relativa respecto al Setpoint de 55 %HR a lo largo del tiempo. En esta nueva ejecución, el sistema muestra una mayor estabilidad en el control de la humedad, con errores que oscilan predominantemente entre -1 % y +1 %.

Dio formato: Resaltar

Dio formato: Resaltar

En la Figura 90 se presenta la evolución del sistema desde los valores iniciales de humedad ambiente hasta alcanzar el setpoint de 55 % de humedad relativa. A medida que el sistema entra en operación, se observa una regulación progresiva de la variable, que finalmente se estabiliza en el valor objetivo. Esta respuesta evidencia el correcto funcionamiento del sistema de control de humedad.

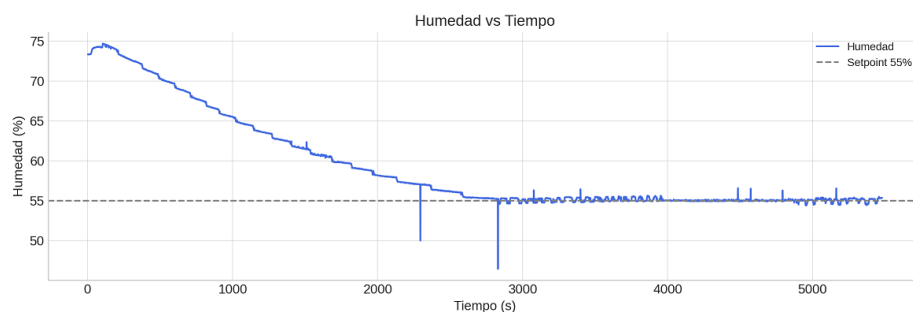


Figura 90. Cambio de Humedad en función del tiempo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Métricas de error de Control de Humedad en Incubadora

Métrica	Valor
Setpoint	55 %HR
Error promedio	0.08 %
Error máximo	+1.57 %
Error mínimo	-8.57 %
Error absoluto medio	0.19%

La gráfica anterior muestra la evolución del error de humedad relativa respecto al Setpoint de 55 %HR a lo largo del tiempo. En esta nueva ejecución, el sistema muestra una mayor estabilidad en el control de la humedad, con errores que oscilan predominantemente entre -1 % y +1 %.

Comentado [JM55]: Esto ya se dijo!

En la Figura 91 se observan algunas perturbaciones puntuales, incluyendo un pico negativo de aproximadamente -8.5 %, posiblemente asociado a variaciones transitorias o fallos momentáneos en la lectura del sensor. No obstante, en términos

generales, el sistema logró mantener la humedad cercana al valor deseado, con un error promedio de 0.08 % y un error absoluto medio de 0.19 %.



Figura 91. Evolución del error de humedad relativa respecto al Setpoint

Fuente: Elaboración Propia

Esta precisión indica que el sistema de control de humedad cumple con los requerimientos para aplicaciones como la incubación de huevos, donde se exige un entorno estable en la humedad. La ausencia de desviaciones sistemáticas prolongadas refuerza la confiabilidad del sistema durante el periodo analizado.

4.2.2. Proceso experimental de validación

Como parte del proceso experimental, se construyó una incubadora casera como se muestra en la figura 92, similar a las que comúnmente fabrican las personas de forma artesanal. El objetivo fue comparar su desempeño frente al sistema desarrollado en este proyecto.



Figura 92. Incubadora casera
Fuente: *Elaboración Propia*

Para esta incubadora se utilizó un cajón de madera de 3cm de grosor debido a su buen aislamiento térmico además de un termostato de control on/off que controla una resistencia de silicona de 100w posicionada frente al ventilador como se muestra en a figura 93.

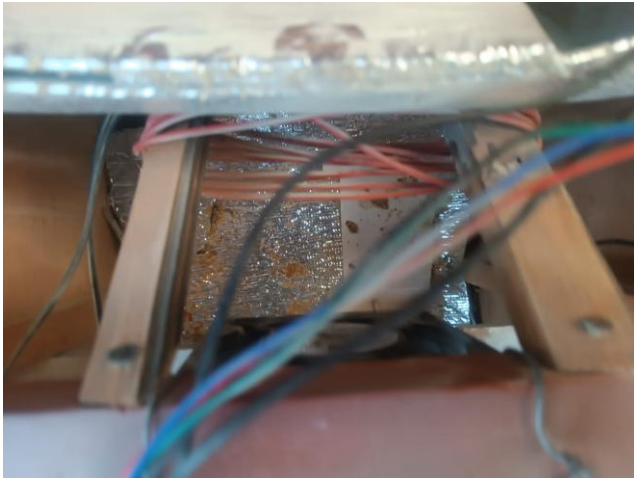


Figura 93. Posición del ventilador y la resistencia
Fuente: *Elaboración Propia*

Para este experimento se utilizaron 48 huevos de gallina criolla, los cuales fueron colocados en posición horizontal dentro del recinto de incubación. El sistema de calefacción estuvo compuesto por una resistencia de silicona y un ventilador, los cuales garantizaron una distribución homogénea del calor en el interior. Para el control de la humedad se emplearon dos recipientes con agua, cuya evaporación permitió aumentar la humedad relativa dentro del recinto, como se muestra en la figura 94.



Figura 94. Incubadora preparada para iniciar proceso de incubación
Fuente: Elaboración Propia

El termostato fue configurado a una temperatura constante de 37.5 °C durante los 21 días del proceso de incubación. La humedad relativa se logró estabilizar en aproximadamente 53 % mediante el uso de recipientes con agua, aunque debido a la constante evaporación, fue necesario rellenarlos periódicamente. En ausencia de estos recipientes, la humedad descendía hasta valores cercanos al 40 %, por lo que en algunos momentos se recurrió al uso de un aerosol manual para incrementar la humedad ambiental. Dado que el sistema no contaba con un mecanismo automático de volteo, los huevos fueron rotados manualmente tres veces al día, una en la mañana, otra en la tarde y finalmente en la noche, tal como lo recomiendan los campesinos de la región. Esta rutina se mantuvo durante los primeros 18 días, reservando los últimos tres días para el proceso de eclosión, en el cual algunos huevos lograron desarrollarse exitosamente, como se observa en la figura 95 y 96.



Figura 95. Pollos en la fase final de la incubadora casera
Fuente: *Elaboración Propia*



Figura 96. Pollos que nacieron exitosamente
Fuente: *Elaboración Propia*

Los resultados correspondientes a este experimento se presentan en la sección 4.2.3.

Experimento de incubadora Automatizada

En el presente estudio, se llevó a cabo la validación del sistema de incubación utilizando 59 huevos de gallina. Durante los primeros 18 días, los huevos se colocaron en bandejas de rotación, como se ilustra en la Figura 97. Durante este período, se mantuvieron parámetros constantes de temperatura a 37,5 °C y humedad relativa al 55%, con rotaciones programadas cada 3 horas. Estas condiciones son consistentes con las recomendaciones para la incubación de huevos de gallina, que sugieren una temperatura de 37,5 °C y una humedad relativa de 55% durante los primeros 18 días del proceso.

Comentado [JM56]: Mejorar la redacción para que refleje lo que quieren decir sin repetir ideas.



Figura 97. distribución de los huevos dentro de la incubadora

Fuente: Elaboración Propia

Al llegar al día 18 del proceso de incubación, el sistema detiene automáticamente la rotación de las bandejas, indicando la transición a la fase de nacedora, que abarca los últimos tres días. En esta etapa, se ajusta la temperatura a 37 °C y se incrementa la humedad relativa al 75%, condiciones óptimas para facilitar la eclosión de los pollitos. Posteriormente, los huevos se retiran de las bandejas de rotación y se colocan en

canastas especialmente diseñadas para el nacimiento, como se muestra en la Figura 98. Este procedimiento asegura que los pollitos dispongan de un entorno adecuado para nacer con libertad y seguridad.



Figura 98. Canastas utilizadas para el nacimiento de los polluelos después de 18 días de incubación

Fuente: Elaboración Propia

Al llegar al día 21 del proceso de incubación, se observa que algunos pollitos comienzan a romper la cáscara para emerger, como se muestra en la Figura 99. Es fundamental no retirar a los pollitos inmediatamente después de su eclosión; se recomienda dejarlos en la incubadora durante varias horas para que se sequen completamente y adquieran fuerza antes de ser trasladados. Este período de adaptación es crucial para su supervivencia y bienestar.



Figura 99. Nacimiento de los polluelos al día 21 de incubación
Fuente: *Elaboración Propia*

Además, es importante retirar las cáscaras vacías y otros residuos de la incubadora de manera regular. La acumulación de estos desechos puede generar un ambiente insalubre, aumentando el riesgo de contaminación y afectando negativamente a los huevos que aún no han eclosionado. Mantener una incubadora limpia y libre de residuos contribuye a un entorno óptimo para el desarrollo y nacimiento de los pollitos.

Al concluir el proceso de incubación, se logró la eclosión exitosa de 40 pollitos, como se muestra en la Figura 100.



Figura 100. Muestra de los 40 pollitos que eclosionaron distribuidos equitativamente en 3 canastas

Fuente: *Elaboración Propia*

Además, es importante mencionar que algunos huevos no lograron eclosionar; los embriones se desarrollaron completamente, pero los pollitos no pudieron romper la cáscara y fallecieron en la fase final, como se muestra en la Figura 101. Para evaluar su estado, se retiraron los huevos de la incubadora y se constató que los embriones estaban muertos al abrir las cáscaras. En la práctica avícola, algunos productores experimentados asisten manualmente a los pollitos que presentan dificultades para eclosionar, aplicando técnicas específicas y determinando el momento adecuado para intervenir sin causar daño al pollito ni al resto de los huevos. Sin embargo, esta práctica requiere experiencia y conocimiento para evitar complicaciones adicionales.



Figura 101. Mortalidad de los polluelos en la fase final de incubación
Fuente: Elaboración Propia

4.2.3.Resultados del Experimento de Incubación

4.2.3.1 Resultados de la incubadora casera

Al finalizar el proceso de la incubadora casera se obtuvieron los siguientes resultados

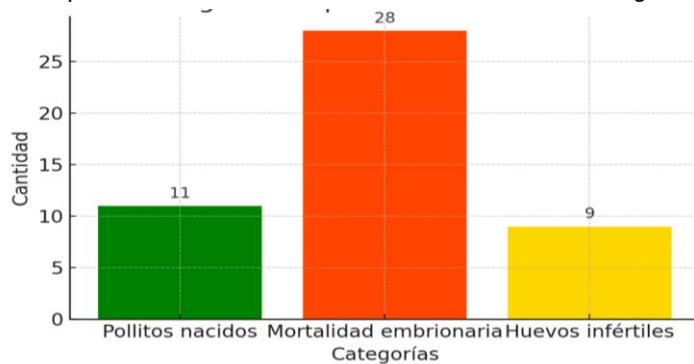


Figura 102. Resultados del proceso de incubación: distribución de nacimientos, mortalidad embrionaria y huevos infértiles en incubadora casera
Fuente: Elaboración propia

En la figura 102 se muestra los resultados del segundo experimento de incubación con un total de 48 huevos de gallina criolla. De estos, solo 11 lograron eclosionar

Comentado [JM57]: Suena extraño segundo sin antes mostrar el primero...etiquétenlo de una forma diferente

exitosamente, representando un 22.9% del total. La mayoría, 28 huevos (58.3%), presentaron mortalidad embrionaria, lo que indica fallas en las condiciones internas del proceso de incubación, relacionadas con el control de temperatura, humedad y rotación de los huevos. Además, 9 huevos (18.8%) resultaron ser infértiles, lo que podría estar vinculado a factores previos al proceso de incubación como la fertilidad del gallo o el almacenamiento de los huevos. En conjunto, la gráfica evidencia un bajo rendimiento del sistema casero y resalta la necesidad de mejorar el control de las variables críticas.

4.2.3.2 Resultados de la incubadora Automatizada

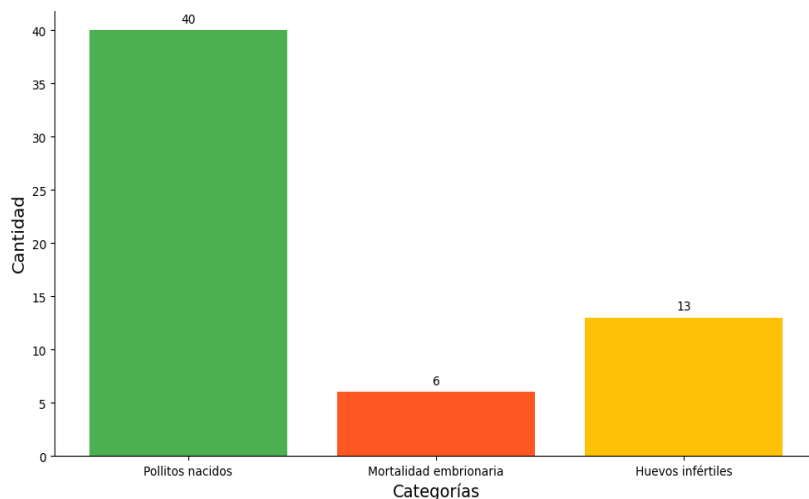


Figura 103. Resultados del proceso de incubación: distribución de nacimientos, mortalidad embrionaria y huevos infértiles en incubadora automatizada

Fuente: Elaboración propia

En la figura 103 se presenta los resultados obtenidos tras el proceso de incubación de 59 huevos de gallina criolla en la incubadora automatizada. En ella, se observa una distribución detallada de los huevos en diferentes categorías según su desarrollo y estado final:

- **Huevos Eclosionados (40):** Representados en color verde, estos huevos completaron exitosamente el proceso de incubación, dando lugar a pollitos saludables.
- **Mortalidad en Fase Final (6):** Indicados en color Rojo, estos embriones llegaron hasta las últimas etapas del desarrollo, pero no lograron eclosionar, sugiriendo posibles complicaciones en las fases finales.
- **Huevos Infértiles (13):** Marcados en color Amarillo, estos huevos fueron identificados como infértiles durante la revisión final, sin signos de desarrollo embrionario.

Comentado [JM58]: Descríbalos como la figura anterior, en párrafos descriptivos con porcentajes

4.2.3.4 Cálculo de la Tasa de Eclosión Ajustada

La tasa de eclosión ajustada se calculó considerando únicamente los huevos fértiles, es decir, aquellos con potencial de desarrollo embrionario. De los 59 huevos incubados, 46 fueron identificados como fértiles (59 menos 13 infértiles). De estos, 40 pollitos nacieron exitosamente. La tasa de eclosión ajustada se determinó utilizando la siguiente fórmula:

Huevos fértiles= (Numero de pollitos nacidos/Numero de Huevos Fértiles)

Huevos Fértiles= (46/40) *100=86.96%

Comentado [JMC59]: No es necesario hacer nuevas secciones para esto, incluirlo como un párrafo de la sección anterior

4.2.3.5 Análisis de Mortalidad Embrionaria

Se registró una mortalidad embrionaria en la fase final del desarrollo correspondiente a 6 casos. Para evaluar este aspecto, se calculó el porcentaje de mortalidad embrionaria en relación con los huevos fértiles:

Mortalidad Embrionaria= (Número de embriones fallecidos en fase final /Numero de Huevos Fértiles)

Huevos Fértiles= (6/46) *100=13.04%

4.2.3.6 Interpretación de los Resultados

Los resultados obtenidos indican una tasa de eclosión ajustada del 86,96%, lo cual refleja una eficiencia considerable en el proceso de incubación. Sin embargo, se

registró una mortalidad embrionaria en la fase final del 13,04%. Este fenómeno puede atribuirse a diversos factores, entre los cuales se incluyen:

- **Calidad del huevo:** Huevos con cáscaras defectuosas o de baja calidad pueden aumentar la mortalidad embrionaria en etapas avanzadas del desarrollo
- **Almacenamiento prolongado:** El almacenamiento de los huevos en el nido hasta por tres semanas puede afectar la viabilidad embrionaria, incrementando la mortalidad en fases posteriores
- **Factores genéticos y sanitarios:** La presencia de genes letales o enfermedades infecciosas en las aves reproductoras puede influir negativamente en el desarrollo embrionario

Para mejorar los resultados en futuros experimentos, es recomendable no solo optimizar las condiciones de incubación, sino también prestar atención a la calidad y manejo de los huevos antes de la incubación. Esto incluye una adecuada selección y almacenamiento de los huevos, así como garantizar la salud óptima de las aves reproductoras.

4.3. Análisis Comparativo y Discusión

4.3.1. Comparación con Dispositivos Comerciales

El sistema evaluado mostró un desempeño sobresaliente en cuanto al control térmico, destacándose por su capacidad para mantener una temperatura constante con una variación promedio mínima de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Este nivel de precisión es especialmente relevante en los procesos de incubación.

Este rendimiento contrasta significativamente con el de las incubadoras comerciales que utilizan convección forzada, las cuales, aunque eficaces, suelen presentar una precisión menor, con fluctuaciones de temperatura en el orden de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Esta diferencia de cuatro veces en la estabilidad térmica resalta la superioridad del sistema evaluado en términos de exactitud y control, lo que puede traducirse en una mayor confiabilidad experimental y una mejor conservación de las condiciones óptimas para el desarrollo embrionario.

4.3.1.1 Análisis de Rentabilidad de la Incubadora Desarrollada

Al evaluar la rentabilidad de una incubadora, resulta crucial analizar la relación entre su capacidad y su costo. En este sentido, la incubadora desarrollada en el presente proyecto presenta ventajas notables frente a los modelos comerciales disponibles en el mercado colombiano.

La construcción de esta incubadora implicó una inversión aproximada de \$1.300.000 COP, permitiendo una capacidad máxima de 352 huevos mediante el uso de bandejas comerciales. El sistema fue diseñado con un alto grado de automatización e incorpora un control detallado de las variables críticas de incubación, lo cual favoreció significativamente la tasa de eclosión.

En contraste, muchas incubadoras comerciales, como las referenciadas en la Tabla 5, presentan limitaciones en cuanto a la relación capacidad-precio y nivel de automatización. Estos equipos, generalmente de fabricación masiva y origen extranjero, tienden a utilizar materiales de menor calidad y ofrecen escasa flexibilidad en el ajuste de parámetros, lo que puede comprometer tanto la eficiencia energética como los resultados del proceso.

A continuación, la Tabla 5 presenta una comparativa técnica entre la incubadora desarrollada y diversos modelos comerciales, detallando sus capacidades y precios aproximados.

Tabla 5. Incubadoras comerciales

Modelo de Incubadora	Capacidad (número de huevos)	Precio Aproximado (COP)
Incubadora Digital con Volteo Automático y Control de Temperatura (listado.mercadolibre.com.co)	48	\$294.130
Incubadora Automática de 98 Huevos (listado.mercadolibre.com.co)	98	\$810.000

Comentado [JMC60]: Sería interesante mencionar que elementos/tecnologías usan los dispositivos comerciales

Incubadora Automática de 112 Huevos (ocompra.com)	112	\$925.000
Incubadora de 16 Huevos con Volteo Automático (listado.mercadolibre.com.co)	16	\$268.300
Incubadora De Huevos 192 Con Tipo Cajón Mini Incubadora	192	\$1.200.000
sistema automático de incubación para optimizar la eclosión de huevos de gallina mediante el control de parámetros ambientales	352	\$1.300.000

4.3.2.Aspectos Positivos del Sistema

El sistema desarrollado demuestra una notable capacidad para mantener constantes los parámetros ambientales, lo cual es esencial para el correcto desarrollo embrionario de los huevos. Su alta estabilidad y precisión se reflejan en la automatización de la temperatura y la humedad, lo que garantiza condiciones óptimas durante todo el proceso de incubación.

La implementación de un sistema completamente automatizado para el control de temperatura, humedad, ventilación y rotación de los huevos reduce significativamente la necesidad de intervención humana, lo que minimiza el margen de error y mejora la eficiencia operativa. Sin embargo, se recomienda una supervisión periódica para detectar y corregir cualquier anomalía que pueda comprometer el desarrollo embrionario.

El diseño de la incubadora ha sido optimizado para maximizar la capacidad de alojamiento de huevos, permitiendo alojar hasta 352 unidades mediante el uso de bandejas comerciales. Esta capacidad incrementada, junto con un costo de producción reducido, ofrece una solución rentable para los avicultores que buscan producir grandes cantidades de pollitos en ciclos de aproximadamente 21 días.

El diseño de la incubadora permite adaptarse a diferentes tipos de huevos, incluyendo los de gallina, pato, ganso, paloma y codorniz. Esta versatilidad resulta especialmente beneficiosa para los avicultores que manejan diversas especies, ya que facilita la incubación de distintos tipos de aves sin la necesidad de contar con múltiples equipos.

4.3.3. Aspectos Para Mejorar

La dependencia de la energía eléctrica representa un aspecto a mejorar en el sistema de incubación automatizado. La operación continua de los componentes, como los sensores, actuadores y el sistema de control, requiere un suministro eléctrico estable. Sin embargo, los cortes de energía, frecuentes en algunas regiones, pueden interrumpir el proceso de incubación, afectando negativamente el desarrollo embrionario. Para mitigar este riesgo, se sugiere la implementación de sistemas de respaldo energético, como generadores eléctricos o fuentes alternativas como paneles solares, que aseguren la continuidad del funcionamiento incluso en caso de fallas en la red principal.

El monitoreo en tiempo real de las condiciones dentro de la incubadora es un área con potencial de mejora. Aunque el sistema actual permite una supervisión básica, la incorporación de sensores conectados a Internet (IoT) mejoraría significativamente la capacidad de respuesta ante posibles anomalías. Esta tecnología permitiría enviar alertas inmediatas al operador en caso de que se detecten desviaciones críticas en temperatura, humedad u otros parámetros esenciales, facilitando una intervención oportuna. Además, el uso de plataformas en línea para el registro histórico de datos brindaría información valiosa para la mejora continua del proceso.

Los costos de implementación asociados al uso de componentes de alta precisión también deben ser considerados. Sensores y actuadores avanzados, si bien aportan mayor exactitud y confiabilidad al sistema, también elevan el costo inicial del mismo. Esto puede representar una barrera para su adopción en instalaciones con presupuestos limitados, como pequeñas granjas o productores independientes. Por ello, se recomienda explorar alternativas que equilibren calidad y costo, o incluso desarrollar versiones modulares del sistema que puedan escalarse según las necesidades y capacidades del usuario.

La validación confirma que el sistema implementado es eficaz y confiable para garantizar el desarrollo apropiado de los huevos de gallina, contribuyendo a mejorar la tasa de eclosión y la calidad del proceso de incubación.

5. Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

La validación experimental del sistema de incubación confirmó que los parámetros críticos, como temperatura y humedad, se mantuvieron dentro de los rangos óptimos para el desarrollo embrionario. La temperatura se reguló de manera estable en 37.5 °C, y la humedad se ajustó dinámicamente según las fases del ciclo de incubación. Durante la prueba con 59 huevos, se obtuvo una efectividad del 86.94% de éxito en la eclosión, lo que representa una mejora significativa en comparación con incubadoras comerciales convencionales, cuya tasa de efectividad promedio es del 70%. Esto demuestra la eficiencia del sistema de control en la creación de un ambiente homogéneo, minimizando fluctuaciones térmicas y garantizando condiciones óptimas para la incubación.

Comentado [JMC61]: ??

El sistema implementado exhibió un alto grado de automatización en comparación con dispositivos comerciales, permitiendo la supervisión y ajuste continuo de variables críticas sin intervención manual. La integración de sensores de precisión y actuadores de respuesta rápida mejoró la estabilidad del entorno de incubación, reduciendo variaciones que podrían afectar la tasa de eclosión y asegurando un proceso más eficiente y repetible.

Comentado [JMC62]: No se menciona que elementos usan los dispositivos comerciales

Se verificó que la renovación del aire, mediante el sistema de ventilación, evitó la acumulación de CO₂ y O₂, garantizando niveles adecuados de oxígeno, factores esenciales para la viabilidad de los embriones. Asimismo, el mecanismo de volteo cumplió con los parámetros establecidos, asegurando una distribución uniforme del calor y evitando la adhesión del embrión a la cáscara. Esto optimizó la homogeneidad del desarrollo embrionario, incrementando la tasa de éxito en la incubación.

Comentado [JMC63]: No se evidenciaron estas medidas!

La integración de herramientas CAD, CAM y CAE permitió evaluar con precisión la disposición estructural del sistema, facilitando tanto la selección de materiales como la optimización de los costos y tiempos de fabricación. A través de análisis estructurales y térmicos, se validó la resistencia mecánica de los componentes, garantizando una distribución eficiente del calor y anticipando posibles puntos de fallo en el diseño. Esta metodología redujo la necesidad de iteraciones físicas en la fase de prototipado, mejorando la eficiencia en la implementación del

sistema y asegurando un diseño funcional acorde a los requerimientos de operación.

5.2. Trabajos futuros

Para mejorar la eficiencia del sistema, se propone aumentar la capacidad de las bandejas de incubación, permitiendo alojar entre 380 y 400 huevos. Esto se lograría

mediante el rediseño de las bandejas con materiales de mayor resistencia mecánica y térmica, como polímeros de alta resistencia, aluminio perforado o acero inoxidable con recubrimientos anticorrosivos, optimizando la distribución del calor y la ventilación. Adicionalmente, se estudiará la implementación de un sistema modular en las bandejas para facilitar su limpieza y mantenimiento, asegurando un ambiente higiénico dentro de la incubadora. El refuerzo estructural del sistema de volteo también será necesario para soportar el incremento de carga sin comprometer su funcionamiento.

Se recomienda la incorporación de sensores adicionales para una gestión más precisa del entorno de incubación. Variables como la concentración de oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂) serían monitoreadas mediante sensores electroquímicos o infrarrojos, permitiendo detectar anomalías y ajustar la ventilación de manera automática. Asimismo, se incluiría un sistema de medición del consumo energético en tiempo real, con la posibilidad de programar modos de operación según la etapa de desarrollo embrionario, optimizando así el consumo eléctrico y reduciendo la variabilidad de las condiciones internas. También se recomienda estudiar la implementación de un sistema de alertas para notificar cualquier desviación crítica en los parámetros ambientales.

Dado que el sistema está diseñado para operar en zonas rurales con acceso limitado a la red eléctrica, se plantea la integración de un sistema fotovoltaico para garantizar su autonomía. Este sistema incluiría paneles solares de alta eficiencia, un banco de baterías de almacenamiento de ion-litio o plomo-ácido sellado, un controlador de carga MPPT para optimizar la captación de energía y un inversor de onda pura para alimentar los componentes electrónicos. Se sigue implementando un sistema de monitoreo en tiempo real que permita analizar la generación y el consumo energético, asegurando una operación continua incluso en condiciones de baja irradiación solar.

Aunque los sensores y actuadores actuales han demostrado ser resistentes y duraderos, se busca mejorar la precisión y la sensibilidad de las mediciones. Se propone el uso de sensores de temperatura de alta resolución, como termopares tipo K o sensores RTD PT100, que ofrecen mayor estabilidad y menor margen de error. Para la medición de humedad, se consideran sensores capacitivos de mayor exactitud, permitiendo un control más preciso del ambiente interno. En cuanto a los actuadores, se evaluará la implementación de servomecanismos o motores paso a paso en el

sistema de control térmico y de ventilación, mejorando la respuesta y estabilidad del sistema.

Actualmente, el proceso de eclosión requiere la apertura de la incubadora para transferir los huevos a canastas especiales, lo que puede generar cambios bruscos en las condiciones ambientales y afectar la viabilidad de los embriones. Para solucionar esto, se propone el diseño de bandejas con doble función, capaces de operar como incubadora y nacedora sin necesidad de intervención manual. Este sistema incluiría una superficie adaptable que permita modificar la inclinación y el soporte de los huevos para evitar su movimiento en la etapa final. Además, se propone desarrollar un mecanismo automatizado que ajuste la ventilación y la humedad de forma progresiva en la fase de eclosión, asegurando un ambiente óptimo para los polluelos sin necesidad de manipulación externa.

6 Referencias Bibliográficas

- [1] «Álvarez Munárriz - 2009 - Estilos de vida y alimentación.pdf».
- [2] «Azcona - 2014 - Hábitos de consumo de huevos, calidad nutricional .pdf».
- [3] «Informe_sector_avicola_final.pdf».
- [4] V. D. B. Arévalo, «PERSPECTIVA DE LA PRODUCCIÓN AVÍCOLA EN COLOMBIA».
- [5] «Informe Trimestral Rabobank 2024: Perspectivas Positivas para el Sector Avícola Mundial», Cadena Avícola. Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cadenaavicola.com/informe-trimestral-rabobank-2024-perspectivas-positivas-para-el-sector-avicola-mundial/>
- [6] «Cauca.pdf».
- [7] «E-UTB-FACIAG-AGROP-000009.pdf».
- [8] J. M. G. Muñoz, «Beneficio en la rentabilidad según el costeo ABC al tecnificar el proceso productivo de una empresa avícola en Lambayeque».
- [9] H. H. Ortiz Chavez y M. E. Cumpa Gavidia, «CAUSAS DE MORTALIDAD EMBRIONARIA EN LA INCUBACION NATURAL Y ARTIFICIAL DE HUEVOS DE

Comentado [JMC64]: Se deben revisar todas las referencias pues la estructura no es adecuada, faltan muchas informaciones!

- PATA CRIOLLA (*Cairina moschata* doméstica L.),» *An. Científicos*, vol. 77, n.º 1, p. 69, jun. 2016, doi: 10.21704/ac.v77i1.547.
- [10] Y. K. G. Moyano, «AUTOMATIZACIÓN DE PLANTA AVICOLA DIRECTOR ING. JULIAN ROLANDO CAMARGO LOPEZ».
- [11] «prototipo de incubadora automatizado de huevo de gallinas.pdf».
- [12] «revista-250.pdf».
- [13] «PORDUCCION-AVICOLA-SOSTENIBLE-Y-CAMBIO-CLIMATICO.pdf».
- [14] G. V. M. René, M. E. C. Osorio, G. C. Nubia, y D. O. M. Ángel, «Automatización de una Incubadora Solar», 2007.
- [15] M. Bunge, *Philosophy of science*, Rev. ed. en Science and technology studies. New Brunswick, NJ: Transaction Publ, 1998.
- [16] «mechatronics system design.pdf».
- [17] S. E. Fonseca Silva, C. D. Herrero Toruño, y A. A. Román Villalta, «INCUBADORA AUTOMÁTICA DE HUEVOS DE AVES DE CORRAL, CON CAPACIDAD DE 100 HUEVOS, NATALIDAD DEL 70%, MONITOREO REMOTO Y DE BAJO COSTO.», UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN.
- [18] R. Sanchis, B. Andrés, y R. Poler, «Methodology to Validate Results from European Research Projects: The C2NET Case Study», *Int. J. Prod. Manag. Eng.*, vol. 7, p. 81, jun. 2019, doi: 10.4995/ijpme.2019.10795.
- [19] J. A. TELLEZ FLORES, «MANUAL DE GALLINAS DE PATIO».
- [20] F. SANCHEZ y A. PRISCILLA, «IMPLEMENTACION DE UNA INCUBADORA SEMIAUTOMATICA PARA LA INCUBACION DE HUEVOS CRIOLLO».
- [21] C. J. Macas Espinoza y C. M. Salazar Alvear, «Diseño y construcción de una incubadora industrial de huevos implementando control de nivel de CO2 para la Empresa Forraje Verde Hidropónico FVH», bachelorThesis, 2022. Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22474>
- [22] R. A. Cardenas Llamas y C. D. Hernández Mendoza, «Construcción de un prototipo de humidificación adiabática de aire para ensayos en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la Tecnológica de Bolívar», <http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0018980.pdf>, 2003, Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/1969>
- [23] O. Prado-Rebolledo, M. Juárez-Estrada, O. Prado-Rebolledo, y M. Juárez-Estrada, «Efecto de la humedad en incubación sobre la incubabilidad y mortalidad embrionaria del pollo de engorda en el trópico seco mexicano», *Abanico Vet.*, vol. 7, n.º 2, pp. 68-74, ago. 2017, doi: 10.21929/abavet2017.72.6.
- [24] N. Ruiz Diaz, G. Orrego, M. Reyes, y M. Silva, «Aumento de la Temperatura de Incubación en Huevos de Gallina Araucana (*Gallus inauris*): Efecto sobre la Mortalidad Embrionaria, Tasa de Eclosión, Peso del Polluelo, Saco Vitelino y de Órganos Internos», *Int. J. Morphol.*, vol. 34, n.º 1, pp. 57-62, mar. 2016, doi: 10.4067/S0717-95022016000100009.
- [25] O. Elibol y J. Brake, «Effect of egg turning angle and frequency during incubation on hatchability and incidence of unhatched broiler embryos with head in the small end of the egg», *Poult. Sci.*, vol. 85, n.º 8, pp. 1433-1437, ago. 2006, doi: 10.1093/ps/85.8.1433.

- [26] «Requisitos de aire durante la incubación», Elsitio Avicola. Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.elsitioavicola.com/articles/1778/requisitos-de-aire-durante-la-incubacion/>
- [27] D. C. Deeming y M. W. J. Ferguson, Eds., *Egg Incubation: Its Effects on Embryonic Development in Birds and Reptiles*. Cambridge ; New York, 2004.
- [28] J. G. S. E y M. J. C. M., «Diseño de un sistema de control de temperatura para una incubadora de huevos», *Tekhnê*, vol. 17, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2020.
- [29] «5_Acciones-de-control_2016.pdf». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf
- [30] C. Francisco, *Motores paso a paso*. Tecnibook Ediciones.
- [31] «Guia Practica de Sensores Antonio Serna Ruiz PDF | PDF». Accedido: 14 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/439701394/327887894-Guia-Practica-de-Sensores-Antonio-Serna-Ruiz-pdf>
- [32] C. B. Engineer *et al.*, «CO₂ Sensing and CO₂ Regulation of Stomatal Conductance: Advances and Open Questions», *Trends Plant Sci.*, vol. 21, n.º 1, pp. 16-30, ene. 2016, doi: 10.1016/j.tplants.2015.08.014.
- [33] «2022_AldairPeñaArbelaez.pdf».
- [34] C. V. A. Perez, «UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA ESCUELA DE ZOOTECNIA».
- [35] K. L. Osanyinpeju, «Development of a Solar Powered Poultry Egg Incubator for South West Nigeria», vol. 3, n.º 6.
- [36] J. Matsson, *An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation 2023*. SDC Publications, 2023.
- [37] «Aislante termico thermolon de 5mm de Plastitek para Techos en PVC», Cielo Raso y Techos en PVC-Plastitek. Accedido: 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://plastitek.com.co/producto/aislante-termico-thermolon-de-5mm/>
- [38] «La solución probada para el diseño y desarrollo de productos en 3D | SOLIDWORKS». Accedido: 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es>
- [39] «(PDF) Programming and Control Circuits of a chicken egg incubator through open source platform», en *ResearchGate*, Accedido: 15 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/311539708_Programming_and_Control_Circuits_of_a_chicken_egg_incubator_through_open_source_platform
- [40] R. A. Balart Gimeno, L. J. Quiles Carrillo, N. Montañés Muñoz, y T. Boronat Vitoria, «Realización de un estudio de análisis estático básico mediante SolidWorks Simulation», jun. 2019, Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/122103>
- [41] B. A. D. V. Soberanes, A. C. Rodríguez, A. R. Ayala, A. F. Moreno, M. G. Macedo, y E. de J. M. Carpintero, «Análisis del Flujo de Fluidos en una Incubadora para todo Tipo de Aves», *Cienc. Lat. Rev. Científica Multidiscip.*, vol. 7, n.º 6, Art. n.º 6, 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i6.8966.
- [42] X. U. Martínez, «Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos».
- [43] Ditevaladmin, «Poliestireno Expandido», Diteval Icopor. Accedido: 14 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ditevalicopor.com/2019/04/08/poliestireno-expandido/>

- [44] «TE_RiveraMalagonAlfonso_2010.pdf.crdownload».
- [45] gfddeu, «¿Qué Temperatura Soporta el Acrílico?», ACRILICOS EN LIMA. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://acrilicos.pe/que-temperatura-soporta-el-acrilico/>
- [46] «Bandeja De 88 Huevos De Pollo,Bandeja De Incubadora De Huevos,La Mejor Calidad,A La Venta - Buy 88 Chicken Egg Tray,Incubator Egg Tray,88 Chicken Egg Tray Incubator Egg Tray For Sale Product on Alibaba.com». Accedido: 31 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Best-Quality-88-Chicken-Egg-Tray-1600276747653.html>
- [47] W. Atlas, «Anual y Mensual del Tiempo - Popayán, Colombia», Weather Atlas. Accedido: 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.weather-atlas.com/es/colombia/popayan-clima>
- [48] «Resistencia De Silicona Para Incubadora 100w 4,2 Metros 110v», Tienda Qbit. Accedido: 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tiendaqbit.com/products/resistencia-de-silicona-para-incubadora-100w>
- [49] R. G. Budynas, «Diseño en ingeniería mecánica de Shigley».
- [50] «Presión de Vapor de agua a diversas temperaturas - Presión de vapor de agua líquida y hielo a varias - Studocu». Accedido: 12 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/quimica-general-ii/presion-de-vapor-de-agua-a-diversas-temperaturas/8751231>
- [51] C. X. Villamar Noboa, «Evaluación de la tasa de incubación en huevos de gallina criolla (Gallus gallus domesticus) utilizando diferentes porcentajes de humedad mediante incubación artificial.», bachelorThesis, Jipijapa - Unesum, 2024. Accedido: 24 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/6802>
- [52] C. A. Chacón, J. D. Cortés, D. A. Giral, y R. R. Romero, «Piezoelectricidad en un BUZZER», vol. 16, 2012.
- [53] «Baliza Rotativa Luz Roja Con Sirena De Emergencia 110v - \$ 98.900». Accedido: 16 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.tuferreteria.com.co/MCO-605388926-baliza-rotativa-luz-roja-con-sirena-de-emergencia-110v-_JM
- [54] Y. A. Ahmad, T. Surya Gunawan, H. Mansor, B. A. Hamida, A. Fikri Hishamudin, y F. Arifin, «On the Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application», en *2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*, Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, jun. 2021, pp. 131-134. doi: 10.1109/ICCCE50029.2021.9467147.
- [55] «Módulo Sensor DHT22 AM2302 Temperatura y Humedad», Electronilab. Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://electronilab.co/tienda/modulo-sensor-dht22-am2302-temperatura-y-humedad/>
- [56] F. N. Abbas, Mis. I. Mohsin Saadoon, Z. K. Abdalrdha, y E. N. Abud, «Capable of Gas Sensor MQ-135 to Monitor the Air Quality with Arduino uno», *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 13, n.º 10, p. 2955, oct. 2020, doi: 10.37624/IJERT/13.10.2020.2955-2959.
- [57] «Reloj con Arduino, cómo controlar los tiempos con un RTC». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/reloj-con-arduino-rtc/>
- [58] «Modulo Reloj RTC DS3231Tiempo Real - Moviltronics». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://moviltronics.com/tienda/modulo-reloj-rtc-ds3231/>

- [59] S. F. Barrett, *Arduino Microcontroller Processing for Everyone! Third Edition*. Springer Nature, 2022.
- [60] «21-optoacopladores.pdf». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.utp.edu.co/jnsanchez/files/2011/03/21-optoacopladores.pdf>
- [61] «Optoacoplador MOC3021». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.electronicaplugandplay.com/optoelectronica/product/299-optoacoplador-moc3021>
- [62] «Optoacoplador 4N25 DIP-6 Colombia». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.electronicaplugandplay.com/optoelectronica/product/1022-4n25-dip-6>
- [63] A. S. G. Valladares y M. E. S. Casallas, «Trabajo de titulación previo a la obtención del título de»:.
- [64] «Proteus VSM - Google Libros». Accedido: 30 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=b1mivOB6_YMC&oi=fnd&pg=PA4&dq=p+roteus+simulador&ots=PvLKRmNk86&sig=HroeBih_NF2kg5MKelq2Khvv2Q#v=onepage&q=proteus%20simulador&f=false
- [65] «Consejos para un buen manejo de la incubadora - Watt Industria Avicola». Accedido: 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.industriaavicola.net/reproduccion-genetica-e-incubacion/consejos-para-un-buen-manejo-de-la-incubadora/>
- [66] SWS, «La Importancia del Volteo Eficiente de los Huevos Durante la Incubación.», EmTech Hatchery Systems Ltd. Accedido: 7 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.emtech-systems.com/es/charlas-tecnicas/the-importance-of-efficient-turning-of-eggs-during-incubation/>
- [67] G. M. Moreno, «Estrategias de control con Arduino», G4r1. Accedido: 26 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://garikoitz.info/blog/2017/12/estrategias-de-control-con-arduino/>