

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

SISTEMA DE CONTROL DE UNA INCUBADORA PARA HUEVOS DE TORTUGA MARINA

T E S I S

para obtener el grado de

LICENCIADA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

P R E S E N T A:

ARIANA TLACUATL SÁNCHEZ

Asesora

Dra. Amparo Dora Palomino Merino

PUEBLA, PUE. JUNIO 2016

Agradecimientos

A la Dra. Amparo, por brindarme la oportunidad y confianza de realizar este trabajo de investigación, por su apoyo y su guía.

A la Comisión Nacional de los Pueblos Indígenas de Miahuatlán, Oaxaca por el apoyo recibido para realizar la investigación de campo en los campamentos tortugueros.

A la Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento de la BUAP, por el financiamiento recibido gracias al 2° Concurso Estudiantil de Prototipos de Innovación Tecnológica.

A mis padres, por su tremendo esfuerzo, dedicación y sacrificios, no sólo en mí pero en sus cinco hijas.

A mi abue Regina, por ser nuestra segunda madre, que con cada abrazo que me da, siento fluir dentro de mí al universo entero.

A mis cuatro hermanas por hacerme más fuerte. A Segali y Amada, por sus consejos, su apoyo y sus exhortaciones. A Gisela y a Aimel por su ayuda, ánimos y apoyo, porque nunca dejaron de creer en mí.

A Toño, por toda su ayuda durante la realización de este trabajo, por su apoyo incondicional, por creer en mi cuando yo no lo hacía.

A mis extraordinarias amigas. A Aida, Mary y Raquel por los monstruosos ánimos que me dieron para seguir, por su ayuda y opiniones.

A mis fantásticos amigos. A Argel, Jair, Sinuhé, Chosto por su ayuda, consejos e ideas. A Ian (donde quiera que estés) por sus consejos y apoyo.

A todas esas personas que sabiéndolo o sin siquiera saberlo, me alentaron y me animaron a no rendirme. A Hilario, Erick, Claudio, Amelia, Lupita, los vampiros, Anita, Jessy, Montse.

Dedicatoria

A mis padres que me lo han dado todo. A mi madre, Gisela, que jamás en la vida encontraré amor mejor, más profundo, más desinteresado ni verdadero que el de mi madre. A mi padre, Aurelio, que por su amor a la vida me ha llenado de experiencias inolvidables, de aprendizajes invaluables, porque un buen padre vale por cien maestros. A mis padres que me han dado raíces, que me han dado alas.

"Cuando muere, todo el mundo debe dejar algo detrás, decía mi abuelo. Un hijo, un libro, un cuadro, una casa, una pared levantada o un par de zapatos. O un jardín plantado. Algo que tu mano tocará de un modo especial, de modo que tu alma tenga algún sitio adonde ir cuando tú mueras, y cuando la gente mire ese árbol, o esa flor, que tú plantaste, tú estarás allí.

No importa lo que hagas – decía – en tanto que cambies algo respecto a cómo era antes de tocarlo, convirtiéndolo en algo que sea como tú después de que separes de ello tus manos. La diferencia entre el hombre que se limita a cortar el césped y un auténtico jardinero está en el tacto. El cortador de césped igual podría no haber estado allí. El jardinero estará allí para siempre".

– Ray Bradbury, Fahrenheit 451

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y construcción de un sistema prototipo de monitoreo y control de los parámetros físicos que intervienen en el desarrollo de incubación de las tortugas marinas, como son: humedad, temperatura, número de huevos por nido y el intercambio de oxígeno. Adicionalmente se presenta el diseño de un soporte con resortes que ayuda a la trasportación de los huevos, para disminuir las perturbaciones que por cuestiones mecánicas sufren los huevos en su traslado de la playa a los albergues tortugueros y de esta manera reducir la pérdida de los productos.

Se construyeron dos incubadoras, una destinada para tortugas hembra y otra para machos debido a que diferentes temperaturas son necesarias para su incubación. Cada incubadora consiste en una caja térmica hecha con policarbonato celular; dentro de ella se incluye un contenedor de fibra de vidrio que simula la cámara de anidación donde se depositan los huevos entre arena. El nido artificial es colocado en un soporte fijo en caso de que ya no se tengan que transportar los huevos o bien se coloca en el soporte con resortes cuando los huevos sean trasladados, de esta manera la mayoría de las perturbaciones son absorbidas por los resortes.

Las variables a controlar son la humedad y temperatura. La temperatura es medida por un sensor de temperatura STH11 para la arena. La señal es adquirida por una tarjeta Arduino UNO. Esta tarjeta también ejerce las acciones de control, además de que mantiene comunicación con una pantalla MicroLCD; el Arduino enviará la información de los sensores a la pantalla y esta se encargará de desplegar dicha información en una interfaz de usuario. Esta interfaz con el usuario permitirá la visualización de la temperatura del nido, día de incubación y una alarma auditiva para indicar que el nido se encuentra en una temperatura fuera del límite permitido.

Abstract

In this work, the design and construction of a prototype system for monitoring and control of the physical parameters that act in the incubation development of sea turtles is presented. The parameters are: moisture, temperature, number of eggs per nest and oxygen exchange. Additionally, the design of a mounting with spring is presented, that help to the carry the eggs in order to decrease the disturbances due to mechanical issues that the eggs suffer when they are been moved from the beach to the turtle camps, and this way decrease the eggs loss.

Two incubators were built, one for female turtles and the other one for male turtles, because different temperatures are required to incubate them. Each incubator consist in one thermic box made of cellular polycarbonate; inside, is included a fiberglass container that simulates the nesting chamber where the eggs are collocated between sand. The artificial nest is collocated in a fixed mounting in case that the eggs do not require to be moved, or by the other hand, when eggs require to be moved, the container is collocated in the mounting with springs in order to decrease the disturbances.

The control variables are moisture and temperature. A temperature sensor STH11 measures the sand temperature. An Arduino UNO card acquires the signal. This card also performs control actions and keep communication with a MicroLCD screen. The Arduino card send the sensor data to the screen in order to show this information in an user interface. This interface with the user allows the visualization of the nest temperature, day of incubation and an audible alarm to indicate that the nest is at a temperature outside the permitted limit.

Índice general

Resumen ..... **I**
Abstract ..... **III**
Índice general ..... **V**
Índice de figuras ..... **VII**
Índice de tablas ..... **XI**
Capítulo 1. Introducción **1**
1.1 Estado del arte 1
1.2 Justificación 4
1.2.1 Tortugas marinas en peligro de extinción 4
1.2.2 Los campamentos tortugueros en Oaxaca, México 8
1.3 Objetivos 17
1.3.1 Objetivo general 17
1.3.2 Objetivos específicos 17
1.4 Alcances 18
Capítulo 2. Factores que influyen en la incubación de tortugas marinas **19**
2.1 La anidación 19
2.2 Humedad y temperatura 20
2.3 Otros factores a considerarse 23
Capítulo 3. Diseño y construcción de la incubadora **25**
3.1 Sistema físico 25
3.2 Sensores 28
3.3 Actuadores 31
3.3.1 Calefacción 31
3.3.2 Enfriamiento 32
3.3.3 Ventilación 33
3.3.4 Humedad 34
3.4 Tarjetas electrónicas 37
3.4.1 Tarjetas electrónicas de potencia 38
3.4.2 Tarjetas electrónicas de adquisición de datos, control e interfaz de usuario 43

Capítulo 4. Diseño e implementación del control e interfaz de usuario **51**
4.1 Control de temperatura 52
4.1.1 Conceptos básicos de controladores on-off y PID 52
4.1.2 Caracterización del sistema 55
4.1.3 Implementación y sintonización del control 62
4.1.4 Ajuste de ganancias utilizando Simulink de MATLAB 63
4.1.5 Ajuste de ganancias utilizando el método de Ziegler-Nichols 68
4.1.6 Ajuste de ganancias manual 73
4.2 Control de humedad 74
4.3 Interfaz de usuario 75
4.4 Programa 76
Capítulo 5. Resultados experimentales **81**
5.1 Resultados experimentales del control 81
5.1.1 Resultados del control PID utilizando las ganancias calculadas por Simulink 82
5.1.2 Resultados del control PI utilizando las ganancias calculadas por Simulink 83
5.1.3 Resultados del control PID utilizando las ganancias calculadas por el método de Ziegler-Nichols 84
5.1.4 Resultados del control PI utilizando las ganancias calculadas manualmente 85
5.1.5 Resultados del control on-off 87
5.2 Resultados experimentales sobre la humedad 88
5.3 Resultados experimentales del desempeño del sistema en general 89
5.4 Propuesta de mejora en la respuesta del sistema empleando resortes para disminuir las vibraciones 90
Capítulo 6. Conclusiones generales **91**
6.1 Conclusiones 91
6.2 Trabajo futuro 92
7. Referencias **95**
8. Anexo A Programa en Arduino **101**
9. Anexo B Programa pantalla **105**
10. Anexo C Programa driver de potencia **107**
11. Anexo D Programa en MATLAB **109**
12. Anexo E Publicaciones y participaciones **111**

Índice de figuras

Figura 1.1 Diagrama de la incubadora desarrollada por el IPN para huevos de tortuga marina..... 2
Figura 1.2 Diagrama de una incubadora casera para huevos de reptiles en general..... 3
Figura 1.3 Incubadora Jaeger para huevos de reptiles..... 3
Figura 1.4 Incubadora Jugaron Reptile para huevos de reptiles..... 4
Figura 1.5 Incubadora Reptipro 6000 para huevos de reptiles..... 4
Figura 1.6 Identificación de las especies de tortugas marinas..... 8
Figura 1.7 Ubicación geográfica de Miahuatlán dentro de la República Mexicana..... 9
Figura 1.8 Ubicación geográfica de Miahuatlán, Oaxaca..... 9
Figura 1.9 Ubicación geográfica de Barra de Navidad dentro de la República Mexicana..... 10
Figura 1.10 Ubicación geográfica de la playa de Barra de Navidad..... 10
Figura 1.11 Playa del campamento tortuguero Barra de Navidad..... 11
Figura 1.12 Corral de protección en Barra de Navidad..... 11
Figura 1.13 Personal del campamento en el corral de protección..... 12
Figura 1.14 Ubicación geográfica de Escobilla dentro de la República Mexicana..... 13
Figura 1.15 Ubicación del campamento tortuguero Escobilla..... 13
Figura 1.16 Playa del campamento tortuguero Escobilla..... 14
Figura 1.17 Ubicación geográfica de La Ventanilla dentro de la República Mexicana..... 15
Figura 1.18 Ubicación geográfica de la playa de La Ventanilla..... 15
Figura 1.19 Playa del campamento tortuguero La Ventanilla..... 16
Figura 1.20 Corrales de protección en La Ventanilla..... 16
Figura 1.21 Corrales de protección en La Ventanilla..... 17
Figura 3.1 Diseño en CAD en Solid Works del sistema de incubación..... 25
Figura 3.2 Caja térmica fabricada con policarbonato celular..... 26
Figura 3.3 Molde de fibra de vidrio fabricado para el contenedor de huevos y arena..... 27
Figura 3.4 Contenedor de huevos y arena fabricada en fibra de vidrio..... 28

Figura 3.5 Soportes a) fijo, y b) con resortes…. 28
Figura 3.6 Sensor de humedad y temperatura SHT11…. 29
Figura 3.7 Máxima precisión de temperatura del sensor SHT11…. 30
Figura 3.8 Sensor de humedad y temperatura HIH-6130…. 30
Figura 3.9 Foco de halógeno para calefacción…. 31
Figura 3.10 Serpentín de cobre…. 32
Figura 3.11 Placa Peltier…. 33
Figura 3.12 Ventilador de corriente alterna…. 34
Figura 3.13 Extractor de aire…. 34
Figura 3.14 Bomba de agua sumergible…. 35
Figura 3.15 Interior de la incubadora…. 36
Figura 3.16 Exterior de la incubadora y bomba de agua…. 36
Figura 3.17 Exterior de la incubadora…. 37
Figura 3.18 Diagrama eléctrico del optocoplador MOC3021 para cargas resistivas (focos)…. 38
Figura 3.19 Diagrama eléctrico del optocoplador MOC3021 para cargas inductivas (ventiladores y bombas)…. 38
Figura 3.20 Diagrama eléctrico en EAGLE de la tarjeta de potencia 1…. 39
Figura 3.21 Diagrama de las conexiones físicas de la tarjeta de potencia 1…. 40
Figura 3.22 Tarjeta física de potencia 1…. 41
Figura 3.23 Diagrama eléctrico en EAGLE de la tarjeta de potencia para el de refrigeración…. 42
Figura 3.24 Diagrama de las conexiones físicas de la tarjeta de potencia para el sistema de refrigeración…. 42
Figura 3.25 Tarjeta física de potencia 2…. 43
Figura 3.26 Diagrama a bloques del funcionamiento del driver de potencia para los focos…. 43
Figura 3.27 Diagrama eléctrico en EAGLE del detector de cruce por cero…. 44
Figura 3.28 Diagrama de conexiones del detector de cruce por cero…. 44
Figura 3.29 Tarjeta física del detector de cruce por cero…. 45
Figura 3.30 Diagrama eléctrico del driver de potencia…. 45
Figura 3.31 Diagrama de conexiones del driver de potencia…. 46
Figura 3.32 Tarjeta física del driver de potencia…. 46
Figura 3.33 Tarjeta electrónica Arduino UNO…. 47
Figura 3.34 Placa Grove de prototipado rápido…. 48
Figura 3.35 Reloj de tiempo real DS1307…. 48
Figura 3.36 Pantalla µLCD-32PTU…. 49
Figura 4.1 Diagrama general a bloques del funcionamiento del sistema…. 51
Figura 4.2 Diagrama a bloques del control de temperatura para la incubadora.. 52
Figura 4.3 Acción de un control PID…. 54
Figura 4.4 Arena recolectada en las playas de Oaxaca…. 55

Figura 4.5 Gráfica de la respuesta del sistema de la incubadora a entrada escalón..... 56
Figura 4.6 Gráfica de la respuesta del sistema de la incubadora a una entrada de tipo escalón para arena tipo playa..... 57
Figura 4.7 Identificación del sistema de la incubadora utilizando la librería System Identification Tool de MATLAB para arena de tipo playa... 58
Figura 4.8 Gráfica del modelo estimado y modelo simulado de arena tipo playa 59
Figura 4.9 Arena Clinoptilolita..... 59
Figura 4.10 Gráfica de la respuesta del sistema de la incubadora a una entrada de tipo escalón para arena tipo zeolita..... 60
Figura 4.11 Identificación del sistema de la incubadora utilizando la librería System Identification Tool de MATLAB para arena de tipo zeolita 61
Figura 4.12 Gráfica del modelo medido y modelo simulado de arena tipo zeolita..... 62
Figura 4.13 Diagrama a bloques en SIMULINK de MATLAB para arena tipo playa..... 64
Figura 4.14 Parámetros del control PI asignados por Simulink para los focos... 65
Figura 4.15 Visualizador gráfico del control PI asignado por Simulink para los focos..... 66
Figura 4.16 Parámetros del control PD asignados por Simulink para los focos... 66
Figura 4.17 Visualizador gráfico del control PD asignado por Simulink para los focos..... 67
Figura 4.18 Parámetros del control PID asignados por Simulink para los focos. 67
Figura 4.19 Visualizador gráfico del control PID asignado por Simulink para los focos..... 68
Figura 4.20 Respuesta experimental a entrada escalón de Ziegler-Nichols..... 69
Figura 4.21 Respuesta del sistema estimado a una entrada escalón unitario para la obtención de los parámetro a y τ..... 70
Figura 4.22 Diagramas a bloques del PID calculado con Ziegler-Nichols en Simulink..... 71
Figura 4.23 Visualizador gráfico del control P estimado con Ziegler-Nichols.... 72
Figura 4.24 Visualizador gráfico del control PI estimado con Ziegler-Nichols... 72
Figura 4.25 Visualizador gráfico del control PID estimado con Ziegler Nichols.. 73
Figura 4.26 Visualizador gráfico del control PI con ganancias sintonizadas manualmente..... 74
Figura 4.27 Diagrama a bloques de control de humedad del sistema en lazo abierto..... 74
Figura 4.28 Entorno de programación del software Workshop 4 de 4D Systems 75
Figura 4.29 Interfaz del sistema..... 76
Figura 4.30 Diagrama de flujo de la configuración del programa en Arduino... 78
Figura 4.31 Diagrama de flujo del programa principal del Arduino..... 79

Figura 4.32 Diagrama de flujo del driver de potencia..... 80
Figura 5.1 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias calculadas por Simulink..... 82
Figura 5.2 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias PI calculadas por Simulink..... 83
Figura 5.3 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias calculadas por Ziegler-Nichols..... 84
Figura 5.4 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias sintonizadas manualmente..... 85
Figura 5.5 Sistema de incubación durante las pruebas..... 86
Figura 5.6 Resultados de la prueba experimental del control On-Off del sistema de enfriamiento..... 88

Índice de tablas

Tabla 1.1 Categorías de riesgo de las especies de tortugas marinas..... 7
Tabla 2.1 Temperaturas registradas que afectan la proporción sexual..... 21
Tabla 3.1 Especificaciones del sensor de humedad y temperatura SHT11..... 29
Tabla 3.2 Especificaciones del sensor de humedad y temperatura HIH-6130... 31
Tabla 3.3 Características de la bomba de agua sumergible..... 35
Tabla 3.4 Características técnicas de la tarjeta Arduino UNO..... 47
Tabla 4.1 Método de Ziegler-Nichols respuesta al escalón..... 69
Tabla 4.2 Ganancias de sintonización calculadas mediante Ziegler-Nichols..... 70
Tabla 4.3 Conexiones de los pines de la tarjeta Arduino UNO..... 77
Tabla 5.1 Ganancias Kp, Ki y Kd utilizadas durante los experimentos..... 81
Tabla 5.2 Ganancias PID calculadas por Simulink utilizadas durante el experimento..... 82
Tabla 5.3 Ganancias PI calculadas por Simulink utilizadas durante el experimento..... 83
Tabla 5.4 Ganancias PID calculadas con Ziegler-Nichols utilizadas durante el experimento..... 84
Tabla 5.5 Ganancias PI sintonizadas manualmente..... 85
Tabla 5.6 Estimaciones de la cantidad de agua requerida por el nido según la clase de arena..... 89

Capítulo 1. Introducción

Con 6 especies en el mundo y 5 de ellas en México, las tortugas marinas comprenden un importante papel en el equilibrio de los ecosistemas marinos. En México desovan y se alimentan en los océanos Pacífico y Atlántico: la caguama (*Caretta caretta*), la carey (*Eretmochelys imbricata*), la lora (*Lepidochelys kempii*), la golfina (*Lepidochelys olivacea*) y la blanca (*Chelonia mydas*). Algunos especialistas aceptan a la tortuga prieta (*Chelonia agassizzii*), mientras que otros la consideran como tortuga blanca. La tortuga laúd (*Dermochelyis coriacea*) es la tortuga marina de mayor tamaño y es la única especie de esta familia. A pesar de que México cuenta con una de las más grandes biodiversidades del mundo, muchas de las especies se encuentran en un peligro crítico. Tal es el caso de todas las especies de tortugas marinas en México que se encuentran en peligro de extinción [1].

Debido a la riqueza de especies de tortugas marinas en México y la grave preocupación que representan la disminución de sus poblaciones, diferentes comunidades, instituciones oficiales y organizaciones no gubernamentales realizan trabajos en campamentos tortugueros, donde los objetivos principales son: proteger a las hembras que llegan a anidar, resguardar los nidos que son desovados en la playa y la liberación de crías al mar. A pesar del gran esfuerzo que se ha hecho para sacar de peligro a las tortugas marinas, ya sean con campamentos tortugueros, medidas legales y jurídicas a favor de ellas, siguen habiendo factores que están fuera del control humano, por lo que es necesario implementar nuevas técnicas basadas en instrumentos y equipos tecnológicos que permitan un mejor desarrollo durante la etapa de incubación de las tortugas.

1.1 Estado del arte

Los avances tecnológicos aplicados en la creación de incubadoras artificiales para huevos de tortugas marinas han sido muy escasos. En México, los esfuerzos principales para que las tortugas marinas nazcan se centran en la protección de playas y traslado de nidos a campamentos tortugueros.

En 2009, el Instituto Politécnico Nacional desarrolló una incubadora de huevos de tortuga marina. El objetivo de la incubadora era el de estudiar el periodo de incubación en que se define el sexo de las tortugas marinas. La incubadora está hecha de una caja de poliestireno, cuenta con un elemento calefactor que se colocó encima del nido. Un termómetro electrónico y un termostato se colocaron debajo del elemento calefactor para obtener la temperatura deseada. Para probar la incubadora se usaron huevos de tortuga marina *Lepidochelys olivacea*. Los huevos fueron incubados a diferentes condiciones térmicas para identificar el periodo en que la temperatura determina el sexo del embrión. El control de temperatura se realiza por medio de una computadora de escritorio [2]. Esta incubadora no se encuentra en el mercado puesto que tiene fines de investigación. Ésta es la incubadora diseñada más cercana para cubrir las necesidades de incubación de las tortugas marinas. En la figura 1.1 se muestra el diagrama de la incubadora.

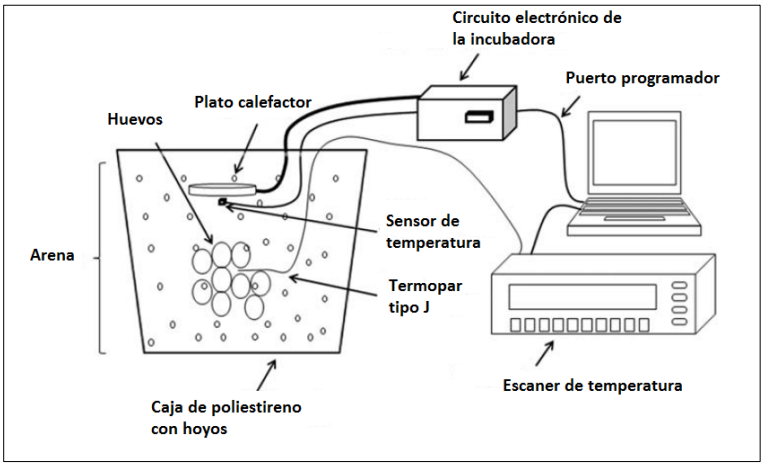


Figura 1.1 Diagrama de la incubadora desarrollada por el IPN para huevos de tortuga marina.

Por otro lado existen algunas incubadoras caseras, éstas están destinadas a la incubación de reptiles en general, como serpientes, iguanas, gekos y algunas especies de tortugas terrestres pequeñas, como la mostrada en la figura 1.2. Consisten básicamente en colocar un recipiente con la arena y huevos, este recipiente se encuentra dentro de otro contenedor en el que se coloca agua y un termostato para calentar el agua y que ésta a su vez caliente a la arena y los huevos [3]. No existe un control de humedad o temperatura. Los usuarios deben de estar monitoreando constantemente la temperatura para asegurarse de que los huevos se encuentran en una temperatura óptima de incubación.

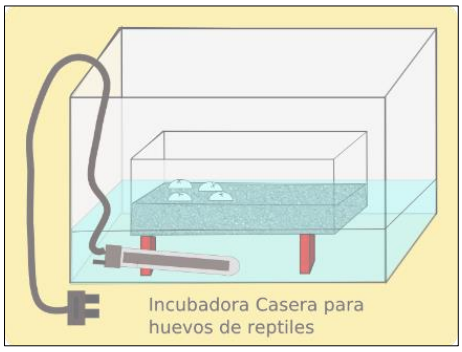


Figura 1.2 Diagrama de una incubadora casera para huevos de reptiles en general.

Existe una gran variedad de incubadoras comerciales, todas destinadas para la producción y venta reptiles en general mas no para tortugas marinas. A continuación se darán ejemplos de esta clase de incubadoras.

La figura 1.3 muestra una incubadora Jaeger [4]. En esta incubadora se puede calibrar la temperatura que se desea incubar los huevos. Tiene una capacidad de 8 huevos. No cuenta con un control de humedad, tampoco hay un monitoreo de la humedad y temperatura. Su costo, es de $3,166.00.



Figura 1.3 Incubadora Jaeger para huevos de reptiles.

Otro ejemplo de incubadoras comerciales se muestra en la figura 1.4, se trata de una Jugaron Reptile [5]. Es más sofisticada que la Jaeger y puede ser programada dependiendo de la clase de huevos de reptil que se estén incubando. Su capacidad es de unos 60 huevos de gecko. Su precio es de $7,275.00



Figura 1.4 Incubadora Jugaron Reptile para huevos de reptiles.

También existe otra variedad de incubadoras comerciales con control digital de temperatura, un ejemplo es la que se muestra en la figura 1.5, una Reptipro 6000 [6]. Éstas cuentan con varios niveles para colocar varios recipientes con vermiculita (sustrato) y los huevos. No cuenta con control de humedad. Un ejemplo de estas incubadoras es la Reptipro 6000. Su precio es de $3,199.00.



Figura 1.5 Incubadora Reptipro 6000 para huevos de reptiles.

1.2 Justificación

1.2.1 Tortugas marinas en peligro de extinción

Como se mencionó anteriormente, todas las especies de tortugas marinas se encuentran en peligro de extinción. Si bien no todas están en el mismo grado de peligro, es preciso conocer la situación en la que se encuentran. Existen diferentes categorías para clasificar el grado de riesgo de extinción en la que se encuentra alguna especie. A continuación mencionaremos las categorías y definiremos las que nos interesan.

En México se utilizan cuatro categorías para las especies que se encuentran en riesgo:

- Probablemente extinta en el medio silvestre.
- En peligro de extinción
- Amenazadas
- Sujetas a protección especial

Las especies en peligro de extinción son aquellas especies cuyas áreas de distribución o tamaño de sus poblaciones en el territorio nacional han disminuido drásticamente poniendo en riesgo su viabilidad biológica en todo su hábitat natural, debido a factores tales como la destrucción o modificación drástica del hábitat, aprovechamiento no sustentable, enfermedades o depredación, entre otros.

Las categorías de riesgo en el mundo son definidas y utilizadas actualmente por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, son complejas por ser más objetivas y son las siguientes:

- Extinta
- Extinta en vida silvestre
- En peligro crítico
- En peligro
- Vulnerable
- Cercanamente amenazada
- Datos deficientes
- Baja preocupación

Se dice que una especie está en peligro crítico cuando enfrenta un alto riesgo de extinción en la naturaleza debido a:

- Una reducción en el tamaño de su población (de más del 90%) durante los últimos 10 años y se entienden las causas de la disminución y es reversible.
- Una reducción en el tamaño de su población (de más del 80%) durante los últimos 10 años si no se entienden las causas de la disminución o no es reversible.
- Si el área de los límites externos de su distribución es menor a 100 km^2.
- Si el área ocupada es menor a 10 km^2.
- Si su población es menor a 250 individuos maduros y continúa reduciéndose.
- Si su población es menor a 50 individuos maduros aunque esté estable.

Cuando una especie está en peligro es debido a:

- Una reducción en el tamaño de su población (de más del 70%) durante los últimos 10 años y se entienden las causas de la disminución y es reversible.
- Una reducción en el tamaño de su población (de más del 50%) durante los últimos 10 años si no se entienden las causas de la disminución o no es reversible.
- Si el área de los límites externos de su distribución es menor a 5,000 km^2
- Si el área ocupada es menor a 500 km^2.
- Si su población es menor a 2,500 individuos maduros y continúa reduciéndose.
- Si su población es menor a 250 individuos maduros aunque esté estable.

Cuando una especie es vulnerable es porque enfrenta un alto riesgo de extinción debido a:

- Una reducción en el tamaño de su población (de más del 50%) durante los últimos 10 años y se entienden las causas de la disminución y es reversible.
- Una reducción en el tamaño de su población (de más del 30%) durante los últimos 10 años si no se entienden las causas de la disminución o no es reversible.
- Si el área de los límites externos de su distribución es menor a 20,000 km^2
- Si el área ocupada es menor a 2,000 km^2.
- Si su población es menor a 10,000 individuos maduros y continúa reduciéndose.
- Si su población es menor a 1,000 individuos maduros aunque esté estable.

Finalmente existe otra categoría que es la de Comercio Internacional. Las especies amparadas por la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES) están incluidas en tres apéndices, según el grado de protección que necesiten. El comercio de las especies, incluidas en los Apéndices, está permitido con base en el cumplimiento de ciertos requisitos. Estos apéndices se encuentran vigentes en 180 países, incluido México desde el año 1991 [7].

- Apéndice I
- Apéndice II
- Apéndice III

El Apéndice I incluye especies en peligro de extinción. En términos generales, el intercambio con fines comerciales está restringido.

		Categoría de riesgo		
Nombre común	**Especie**	**En México [8]**	**En el mundo**	**Convención CITES [9]**
Golfina	*Lepidochelys olivacea*	En peligro de extinción	Vulnerable	Apéndice I
Caguama	*Caretta caretta*	En peligro de extinción	En peligro	Apéndice I
Carey	*Eretmochelys imbricata*	En peligro de extinción	En peligro crítico	Apéndice I
Verde	*Chelonia mydas*	En peligro de extinción	En peligro	Apéndice I
Lora	*Lepidochelys kempii*	En peligro de extinción	En peligro crítico	Apéndice I
Laúd	*Dermochelys coriacea*	En peligro de extinción	En peligro crítico	Apéndice I

Tabla 1.1 Categorías de riesgo de las especies de tortugas marinas.

Las razones por las que las diferentes especies de tortugas marinas se encuentran en peligro de extinción son muy variadas. En la figura 1.6 se observan las especies de tortugas marinas. El cambio climático, contaminación, la pesca no moderada, depredación natural, entre otros, son factores principales que contribuyen a este gran problema.

Cabe resaltar que cuando la tortuga deposita sus huevos en la playa, éstos quedan enterrados bajo la arena durante un periodo de tiempo para continuar con su ciclo de vida. Ésta es considerada una de las etapas más vulnerables, ya que los huevos quedan expuestos a diversos fenómenos que provocan la pérdida de nidos; los huracanes, la erosión de la playa, inundaciones, sequías, depredación natural y el saqueo por humanos entre otros.

Para reducir estos efectos se han realizado diversas técnicas para la protección de los nidos como son: trasladarlos a corrales de incubación donde nuevamente se siembran y protegen; el uso de cajas de poliuretano con arena e incubados en salas para este fin [10]; nidos *in situ* protegidos mediante malla metálica y la protección y vigilancia cuando las anidaciones son masivas, mediante personal dedicado a esa tarea [11].

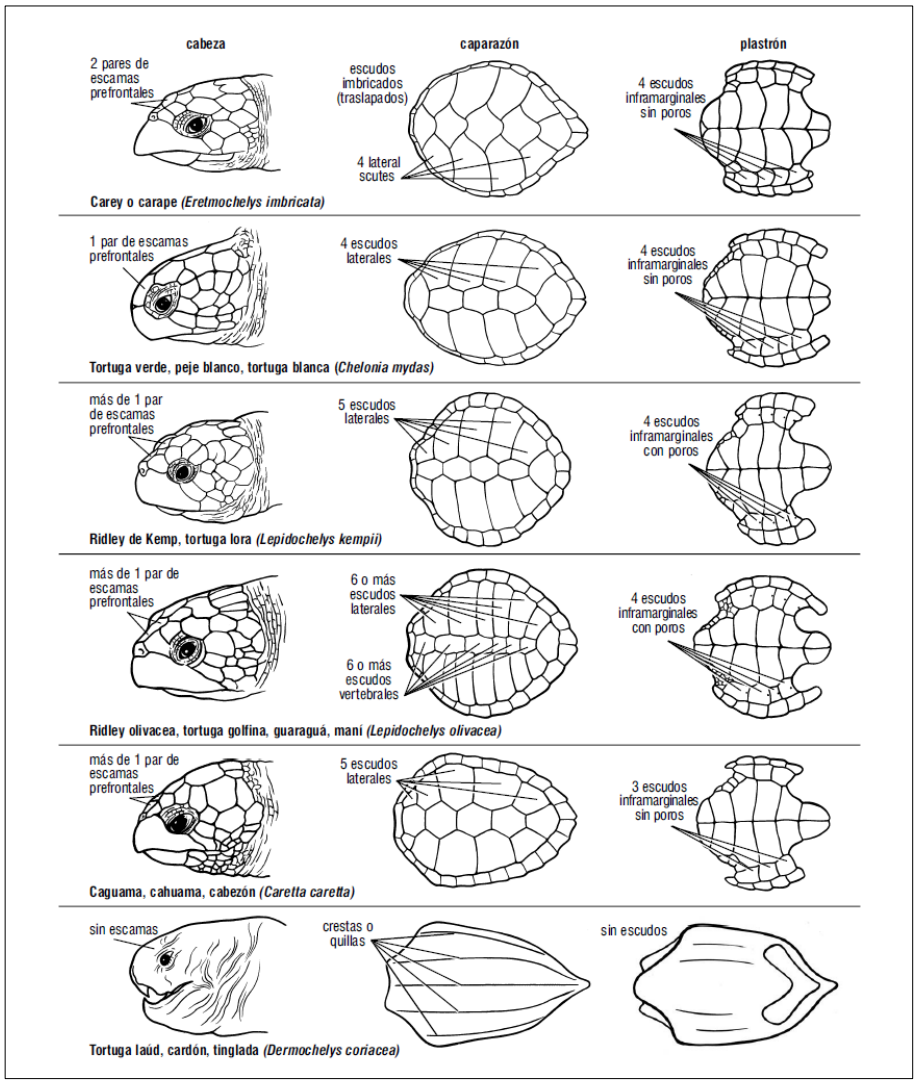


Figura 1.6 Identificación de las especies de tortugas marinas [12].

1.2.2 Los campamentos tortugueros en Oaxaca, México

Al menos en el estado de Oaxaca dentro de su red de humedales, 4 especies de tortugas eligen sus playas para anidar. La golfina, prieta, carey y laúd; siendo la golfina la principal por el número de nidos que ponen. Tan sólo en la playa de Escobilla llegan a anidar alrededor de unas 35 mil tortugas en temporada alta, en otras playas como las de Barra de Navidad y Ventanilla la tortuga golfina también arriba en cifras significativas. Por tal motivo, a lo largo de toda la costa de Oaxaca existen campamentos tortugueros muy variados en cuanto a su infraestructura y número de nidos que albergan. Los trabajos de estos campamentos tortugueros son muy importantes ya que realizan diferentes tareas que tienen como objetivo liberar a la mayor cantidad de tortugas marinas.

A continuación se describirán 3 campamentos tortugueros que se encuentran en Oaxaca. Las visitas que se realizaron fueron a través de la Comisión para el Desarrollo de los pueblos indígenas delegación Miahuatlán. En la figura 1.7 se observa la ubicación de Miahuatlán de Porfirio Díaz dentro de la República Mexicana, en la figura 1.8 se observa un mapa del mismo.



Figura 1.7 Ubicación geográfica de Miahuatlán dentro de la República Mexicana.

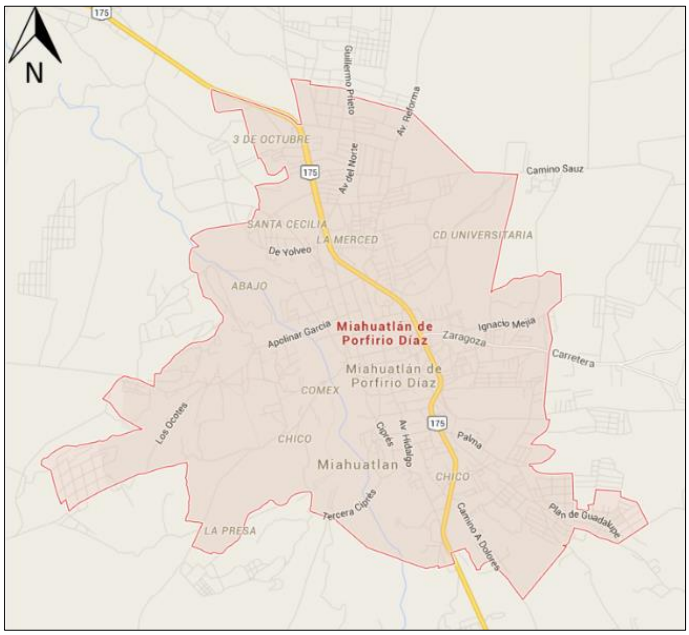


Figura 1.8 Ubicación geográfica de Miahuatlán, Oaxaca.

Barra de Navidad

Barra de Navidad es una pequeña localidad que se encuentra a 5 km al sureste de Puerto Escondido. Esta comunidad cuenta con una playa de 3.6 km de longitud, en la figura 1.9 se muestra su localización dentro de México y en la figura 1.10 se muestra la localización de su playa.



Figura 1.9 Ubicación geográfica de Barra de Navidad dentro de la República Mexicana.

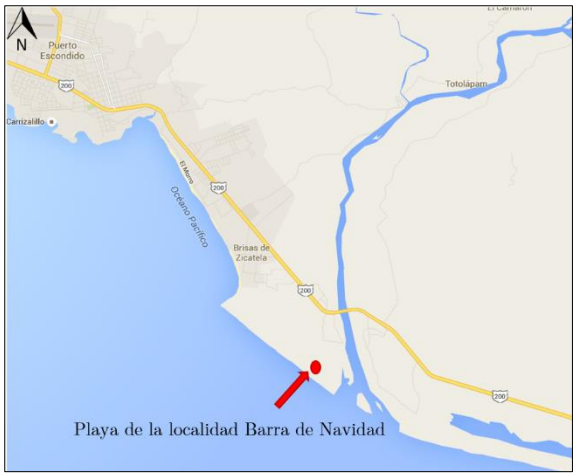


Figura 1.10 Ubicación geográfica de la playa de Barra de Navidad.

El campamento lo conforma un grupo comunitario de 54 personas dirigidas por un comité de 4 personas.



Figura 1.11 Playa del campamento tortuguero Barra de Navidad

El trabajo que se realiza dentro de este campamento consiste en lo siguiente:
Lo primero es limpiar la playa para que una vez que las tortugas salgan del mar puedan encontrar un sitio dónde anidar, libre de basura. En la figura 1.11 se observa la playa del campamento. Después, se organizan en grupos de ocho personas que se dedican a cuidar la playa durante el día, haciendo relevos con otro grupo por la noche. Esta vigilancia se debe a que la playa no cuenta con la protección de alguna autoridad, por lo cual existe una gran cantidad de saqueos de nidos y de matanza de tortugas. Una vez que se localiza a la tortuga que va a anidar, se le vigila y cuida hasta que ésta termina de anidar. Entonces se hace el traslado de los huevos a corrales de protección que se muestran en la figura 1.12.



Figura 1.12 Corral de protección en Barra de Navidad.

El traslado de los huevos se hace a pie, los huevos se introducen en bolsas de plástico por lo que no representa un factor de pérdida de huevos ya que no hay muchas perturbaciones durante el viaje. Una vez que los nidos han sido reubicados dentro de los corrales de protección, sólo resta cuidarlos hasta que eclosionen y por último se liberan a las tortugas al mar.

Durante la temporada alta en el mes de agosto, es casi seguro que el 100% de los huevos nazca gracias a que las temperaturas no son tan elevadas y la temporada de lluvia comienza, siendo la tortuga golfina la principal tortuga que llega a arribar a esta playa, otras tortugas que también llegan a esta playa son la prieta y muy infrecuentemente la Laúd.

En este campamento informó de los principales factores de riesgo que corren los nidos; éstos son esencialmente los saqueos y la temperatura extrema. Lo primero es debido a que esta playa no cuenta con ningún respaldo de alguna autoridad, por lo tanto los saqueos no son penalizados y es muy común encontrarse con saqueadores en la zona. Lo segundo es porque en los meses de mayo, junio y julio las temperaturas que se registran en el lugar son muy altas, siempre por arriba de los 35°C y que pueden llegar hasta los 40°C, por lo que han reportado una pérdida total de los huevos.

La mortalidad de los huevos ha sido muy alarmante para todos en el campamento, asegurando que estos hechos se deben al calor excesivo, ya que su corral de protección no cuenta con sombra. En otros campamentos no se reportan estas pérdidas ya que sus corrales cuentan con malla-sombra. En la figura 1.13 e observa al personal del campamento dentro de un corral de protección sin sombra.



Figura 1.13 Personal del campamento en el corral de protección.

Escobilla

Este campamento se encuentra en el municipio de Santa María Tonameca. En la figura 1.14 se muestra su localización dentro de México y en la figura 1.15 se muestra la localización de la playa. Su playa es de 12 km de largo y 70 m de ancho.



Figura 1.14 Ubicación geográfica de Escobilla dentro de la República Mexicana.



Figura 1.15 Ubicación del campamento tortuguero Escobilla.

Las tortugas, principalmente la golfina, llegan a anidar en arribazones. Ésto significa que durante varios días miles de tortugas llegan a esta playa para anidar. Generalmente un arribazón es de 20 a 25 mil tortugas que ocupan 4 km completos de playa. En este campamento se tiene registrado el arribazón más grande del mundo. La tortuga laúd y prieta también visitan a esta playa. En la figura 1.16 se muestra la playa del campamento.



Figura 1.16 Playa del campamento tortuguero Escobilla.

Al ser este campamento tortuguero uno de los más grandes en el mundo, se encuentra bajo el resguardo de la marina y las personas que sean encontradas saqueando los nidos o capturando tortugas son castigadas con cárcel. En este campamento también han reportado pérdidas considerables debido a las altas temperaturas, declarando que una vez empezando las lluvias, los huevos se desarrollan adecuadamente.

La Ventanilla

Este campamento tortuguero se encuentra en la comunidad de La Ventanilla y es también un centro eco-turístico. En la figura 1.17 se muestra la ubicación de La Ventanilla dentro de México y en la figura 1.18 se muestra la ubicación de su playa.



Figura 1.17 Ubicación geográfica de La Ventanilla dentro de la República Mexicana.



Figura 1.18 Ubicación geográfica de la playa de La Ventanilla.

Su playa es de 15 km y también cuentan con manglares en la zona por lo que existe una gran biodiversidad de aves y cocodrilos. En la figura 1.19 se observa la playa del campamento.



Figura 1.19 Playa del campamento tortuguero La Ventanilla.

En este campamento el trabajo que se realiza para ayudar a las tortugas está a cargo de sólo dos personas, por lo que las tareas pueden llegar a ser agotadoras e insuficientes. Además de que el permiso con el que cuentan restringe a cuidar 4 km de playa. Las labores que realizan en campamento son las de hacer recorrido a lo largo y ancho de toda la playa, localizar los nidos de tortugas y trasladar los huevos a sus corrales de protección. Es importante mencionar que el traslado de los huevos se lleva a cabo en cuatrimotos, dando como consecuencia un avivamiento de aproximadamente el 80% de las tortugas. Sus corrales de protección contaban con malla-sombra lo cual ha sido de mucha ayuda en los meses de mayo a julio, sin embargo esta malla es retirada en los siguientes meses debido a que se va dañando y no hay oportunidad de comprar nuevos rollos debido a su alto costo. En la figuras 1.16 y 1.17 se muestra el corral de protección con malla-sombra.



Figura 1.20 Corrales de protección en La Ventanilla.



Figura 1.21 Corrales de protección en La Ventanilla.

En estas playas la tortuga golfina también es la que anida principalmente, la tortuga laúd también llega a anidar en estas playas pero sus nidos no son trasladados debido a que si son expuestos a grandes perturbaciones se pierden los productos.

Los campamentos tortugueros cumplen con un rol muy importante en la conservación de las tortugas marinas, por lo que es muy importante la creación de nueva tecnología que permita aumentar su eficiencia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de monitoreo y control de humedad y temperatura para determinar el sexo del embrión de tortuga marina e incrementar el porcentaje de avivamiento de los huevos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar una incubadora prototipo que cumpla con los requerimientos óptimos de: número de huevos por nido (100 huevos de tortuga golfina), ventilación del nido, cámara de incubación resistente.
- Implementar un control de lazo cerrado de temperatura: 32 grados centígrados para hembras y 28 grados centígrados para machos, con un error del ± 1 grado centígrado.
- Implementar un control de lazo abierto de humedad de la arena.
- Realizar un resumen sobre los principales factores que influyen en la incubación de tortugas marinas.
- Adaptar resortes al sistema para disminuir la perdida de productos provocadas por el traslado en cuatrimotos.

1.4 Alcances

El alcance de este trabajo consiste en el diseño de un sistema prototipo físico de la incubadora, el diseño del control de la humedad y temperatura, la construcción de dos incubadoras prototipos, así como pruebas experimentales y análisis de resultados del sistema. La puesta en marcha de la incubadora en campamentos tortugueros, así como pruebas utilizando huevos de tortuga marina *Lepidochelys olivacea* no se contemplan como alcances de este trabajo de tesis.

Capítulo 2. Factores que influyen en la incubación de tortugas marinas

En éste capítulo comprenderemos el proceso natural de anidación de las tortugas marinas y resumiremos los principales factores ambientales que actúan durante la incubación de los huevos. Se ha considerado que algunos factores ambientales influyen en el desarrollo embrionario de los huevos por lo que al formar la cámara de incubación, ésta debe mantener condiciones adecuadas de temperatura, humedad e intercambio de oxígeno entre el medio ambiente y los huevos, mismos que al mantenerse en valores óptimos favorecen el avivamiento.

2.1 La anidación

Las tortugas marinas son animales marinos migradores que realizan sus puestas en tierra. Los machos y las hembras adultos migran de las áreas de alimentación a las áreas de cópula y reproducción. Una vez realizadas las cópulas, las hembras seguirán en las áreas de reproducción para realizar las puestas, mientras que los machos regresaran a las áreas de alimentación. Durante los tres o cuatro meses que dura la época de anidación, las hembras se dirigirán a tierra aproximadamente cada 15 días para poner varios nidos (de 2 a 7 nidos), cada uno de ellos con un número de huevos relativamente alto. Las tortugas marinas presentan una alta filantropía a las zonas de reproducción, es decir que regresan a realizar sus puestas a las playas de anidación donde nacieron. Después regresarán a las áreas de alimentación hasta el siguiente periodo de reproducción (aproximadamente cada dos años, variando esta frecuencia entre 1 y 4 años). La incubación de los huevos se realiza en torno a los 50 días sin cuidado parental. Las crías eclosionarán del nido y se dirigirán hacia el mar donde nadarán durante 36 horas seguidas para llegar a alta mar, iniciando así su vida marina [13].

Para las tortugas marinas la selección de un espacio para anidar puede resultar complejo, algunos estudios de tortuga *Caretta caretta* en Australia se demuestra que un 80.3% de las tortugas por lo menos selecciona un lugar de puesta inadecuado para

la incubación de los huevos en la misma temporada de anidación [14]. Otro estudio en Colombia de tortuga Laúd demuestra que en zonas limpias de basura orgánica, las hembras seleccionan lugares más alejados del mar para poner sus nidos, mientras que en playas con basura las hembras encuentran obstáculos, poniendo los nidos a menos distancia del agua y en consecuencia aumentando el riesgo de inundación de los huevos [15].

2.2 Humedad y temperatura

La temperatura y humedad en la arena son factores que influyen directamente en el número de crías que emergen de los nidos (avivamiento), por lo que es importante conocer cómo fluctúan estas variables físicas. La variación de estos factores puede marcar la pauta de la instalación del corral de protección de un lugar a otro, lo cual tiene una repercusión directa en la viabilidad de los nidos, ya que sin las condiciones propicias se puede generar una baja en la producción de crías o en el peor de los casos una pérdida total de nidos [16].

En tortugas marinas la temperatura de incubación afecta directamente a los nidos con relación a la proporción sexual. A temperaturas elevadas hay una mayor producción de hembras, mientras que a temperaturas bajas se genera una mayor producción de machos. La temperatura pivote, es el rango de temperatura de incubación a la cual se producen un 50% de machos y un 50% de hembras [17].

La temperatura además de ser un factor que determina la proporción sexual en las crías, también tiene una gran importancia en la incubación y desarrollo de los huevos. Se ha comprobado que la temperatura de incubación afecta al tamaño y peso de las crías al nacer [18], pudiendo afectar también la tasa de crecimiento en fases juveniles tempranas como ocurre en otros reptiles [19]. El tamaño de las crías al nacer, además puede condicionar a una mayor o menor exposición a los predadores [20].

Los niveles de temperatura letales son definidos como temperatura límite a un intervalo variable que no permite la producción de crías. Sin embargo, tales temperaturas no son necesariamente una condición mortal si son únicamente parte de una fluctuación del patrón o una exposición de un suceso limitado en tiempo durante el periodo de incubación.

En la tabla 2.1 se muestran las temperaturas promedio de anidación necesarias para gestar hembras y machos de cada especie de tortuga marina, de acuerdo a las investigaciones de diferentes autores.

Nombre común	Especie	Temp. Macho	Temp. Hembra	Temp. Pivote	Referencia	Año
Golfina	*Lepidochelys olivacea*	28°C	32°C	28-32°C	McCoy et al.	1983
Caguama	*Caretta caretta*	28°C	30°C	28°C	Tokunaga et al.	1999
Carey	*Eretmochelys imbricata*	No info.	No info.	29.5°C	Mrosovsky	1992
Verde	*Chelonia mydas*	27°C	33°C	No info.	Bustard y Greenham	1968
Lora	*Lepidochelys kempii*	28.4°C	30.8°C	No info.	Aguilar	1987
Laud	*Dermochelys coriacea*	27.28°C	31°C	No info.	Lescure et al.	1985
Todas		27°C/ 28°C	32°C/ 30°C	No info.	Bustard/ Mrosovsky	1971

Tabla 2.1 Temperaturas registradas que afectan la proporción sexual.

Los cambios climáticos actuales han afectado las proporciones sexuales en las tortugas. Debido a las alzas de temperatura registradas en las últimas temporadas, las poblaciones de tortugas marinas están altamente sesgadas hacia las hembras [21], sobrepasando el 80% en Brasil [22], el Mediterraneo [23] o Florida [24].

Por otra parte, la cantidad de humedad en la arena es un factor determinante para la anidación en las tortugas marinas. La falta de suficiente humedad en la arena de la playa a profundidad similar a la del nido, causa que la cámara donde se depositan los huevos se colapse mientras la tortuga está construyendo el nido y cuando falla la construcción, la tortuga se mueve a otro lugar, esperando que sea mejor, e intenta anidar nuevamente [25]. Esto puede ser un mecanismo innato, el cual previene que las tortugas marinas aniden en áreas sujetas a la desecación.

Así como la temperatura, la humedad de la arena es un parámetro importante para el desarrollo embrionario, que debe de mantenerse en valores óptimos.

Existen pocos trabajos donde se presenten datos del contenido de agua en sustratos de playas de anidación necesarios para una buena producción de crías. Los estudios para conocer la humedad óptima y los límites mínimos y máximos de tolerancia de la humedad en nidos de huevo de tortuga marina varían mucho, incluso puede variar dependiendo de cada especie o playa por lo que no están todavía bien establecidos [26]. Según la bibliografía consultada tenemos la siguiente información:

- Un estudio con nido de tortuga caguama (*Caretta caretta*), determinó que de cinco diferentes condiciones de humedad de saturación, los nidos que mantuvieron los más altos porcentajes de avivamiento fueron los que se incubaron con 25% de humedad de saturación, mientras que los nidos con porcentajes de 0, 50, 75 y 100% de humedad de saturación, mantuvieron avivamientos significativamente más bajos. Concluyendo que la humedad óptima fue la de 25%. Los huevos pueden requerir de más agua que la contenida en su interior obteniéndola de su medio circundante [27].
- En un trabajo experimental realizado con tortuga boba (*Caretta caretta*), se observó que a humedades aproximadas al 6% de contenido de agua en relación al peso del sustrato (potencial hídrico de -5,8 kPa), el éxito de eclosión de los huevos y tamaño de las crías era mayor que en otros tratamientos de humedad inferiores y superiores (0%, 12%, 18% y 24%), sugiriendo que el 6% es el grado de humedad idóneo para la incubación, aunque no encontraron diferencias significativas en el éxito de eclosión con el tratamiento de 12% [28].
- En tratamientos experimentales de humedad por encima de un 10% (potencial hídrico aproximado de -4.8 kPa), causan una mortalidad total en los huevos de tortuga Laúd (*Dermochelys coriacea*). En otro trabajo de la misma especie, en el cual experimentalmente se reproducen condiciones hídricas simulando tormentas tropicales, se comprueba que los huevos sobreviven bien a periodos cortos de alta humedad, y sin embargo no sobreviven en sustratos muy húmedos en exposiciones de más de ocho días [29]. También, parece ser que los huevos son más sensibles a altas concentraciones de agua en las primeras fases de la incubación.

De forma práctica, es bien conocido que la inundación de los nidos debido a las mareas es una de las principales causas de mortalidad de huevos, siendo común la práctica de recolocar a corrales de protección a aquellos nidos en riesgo de inundación [30].

El contenido de agua en el ambiente de incubación es altamente dependiente de las características del sustrato. El tamaño del grano y el tipo de sustrato de incubación del nido influirá de forma directa en la cantidad de agua disponible para los embriones. Sustratos de grano fino dejarán menores espacios intersticiales en el ambiente de incubación reteniendo un mayor contenido de agua que sustratos de grano grueso. Esa mayor o menos retención de agua por parte del sustrato influirá de forma directa en la disponibilidad de agua de los huevos. En Ascencion Island se ha observado que el éxito de eclosión de los nidos era menor en playas de arena gruesa que en aquellas playas de arena fina, sugiriendo que pudiera deberse a un ambiente de incubación demasiado seco para un adecuado desarrollo embrionario de los huevos [31].

2.3 Otros factores a considerarse

Las tortugas marinas anidan en playas de características físicas variadas, pero no es evidente el por qué escogen una playa en lugar de otra. Sin embargo, requieren de una serie de factores básicos para llegar al lugar de anidación, como el de un fácil acceso a la playa, la plataforma debe ser lo suficientemente alta para que el nido quede fuera de la acción del oleaje o de alguna inundación por efecto de la marea, la arena de la playa debe ser lo suficientemente húmeda y fina para evitar el derrumbe del nido mientras se está construyendo [32] y en algunas especies como la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) la presencia de abundante vegetación es importante [33].

La coloración del sustrato y el albedo (porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma) influirán en la recepción de calor de la arena por la radiación solar, afectando a la temperatura de incubación de los nidos. Playas de arena clara tendrán temperaturas de incubación más bajas que playas de arena oscura [34].

Igualmente, el contenido de sal que contenga un sustrato afectará al intercambio de agua entre el huevo y el ambiente por el efecto osmótico. Altos contenidos de sal en el agua o en el sustrato de incubación, pueden deshidratar los huevos.

Otro factor biológico que afecta a la incubación es la presencia de vegetación. La vegetación en las playas de incubación crea zonas de sombra disminuyendo la cantidad de radiación solar que recibe la superficie de la arena, pudiendo influir en algunos casos en la temperatura de incubación de los nidos. En estos momentos, la reforestación en playas de anidación se está considerando como una medida de conservación para equilibrar la elevada producción de hembras debido a las altas temperaturas de incubación que se están registrando [35]. En áreas de anidación áridas, las raíces de las plantas encuentran en los nidos de tortuga marina una fuente de agua y nutrientes [36]. En áreas de anidación como Cabo Verde, las raíces de las plantas recubren los huevos pudiendo colonizar la totalidad del nido, pudiendo ser responsable de la mortalidad del nido.

Los requerimientos de oxígeno por parte de los embriones en desarrollo de un nido también han sido estudiados. Una vez enterrados los huevos en el sustrato, los gases (O2 y CO2) deben moverse entre los espacios intersticiales que existen entre los huevos y los granos de arena. Los mecanismos por los cuales se produce un movimiento de los gases son convección o difusión. El oxígeno que consumen los embriones durante su metabolismo proviene de la atmósfera a través del sustrato que rodea el nido, pero este proceso puede aumentar con un intercambio de gas convectivo (por medio del movimiento del fluido) que ventila el nido y eleva la concentración de oxígeno. El intercambio de gases entre los huevos y el ambiente de incubación será fundamental

para el éxito del nido. El tamaño del grano del sustrato, el grado de compactación del sustrato y el contenido de agua y aire del entorno del nido influirán en la disponibilidad de oxígeno de los huevos para su desarrollo. Según estas características es posible que se den situaciones de hipoxia (estado de deficiencia de oxígeno en la sangre, células y tejidos del organismo, con compromiso de la función de éstos). Una baja conducción de gases en la arena provoca un mayor tiempo de incubación y un menor éxito de eclosión (acción de nacer o brotar un ser vivo después de romper la envoltura) del nido. El requerimiento de oxígeno es mayor al aumentar el metabolismo de los embriones a partir del segundo tercio de incubación.

Es así que tanto los factores físico-químicos como los biológicos del ambiente del nido interaccionan entre sí, creando complejas combinaciones de posibilidades que afectarán al desarrollo embrionario de los huevos y al éxito de eclosión de estos. Otras características inherentes del nido, como el tamaño de puesta o la posición de los huevos en el interior del nido, condicionarán parámetros de la incubación como la disponibilidad de oxígeno, de humedad y la temperatura de cada huevo afectando al éxito final del desarrollo total de los nidos y las características de los individuos al nacer. Los propios nidos y el ambiente de incubación de los nidos resultan en una compleja dinámica interconexión ecológica [37].

Capítulo 3. Diseño y construcción de la incubadora

En el capítulo anterior se resumieron los principales factores para el desarrollo de incubación de las tortugas marinas. En este capítulo describiremos las características del diseño físico propuesto para la incubadora.

3.1 Sistema físico

Las características que se tomaron en cuenta para el diseño de la incubadora están basadas en los factores de incubación que se consideraron primordiales para un buen desarrollo y avivamiento de los huevos. Éstos son; la humedad, temperatura, ventilación del nido (oxígeno), número de huevos por nido y tipo de arena.

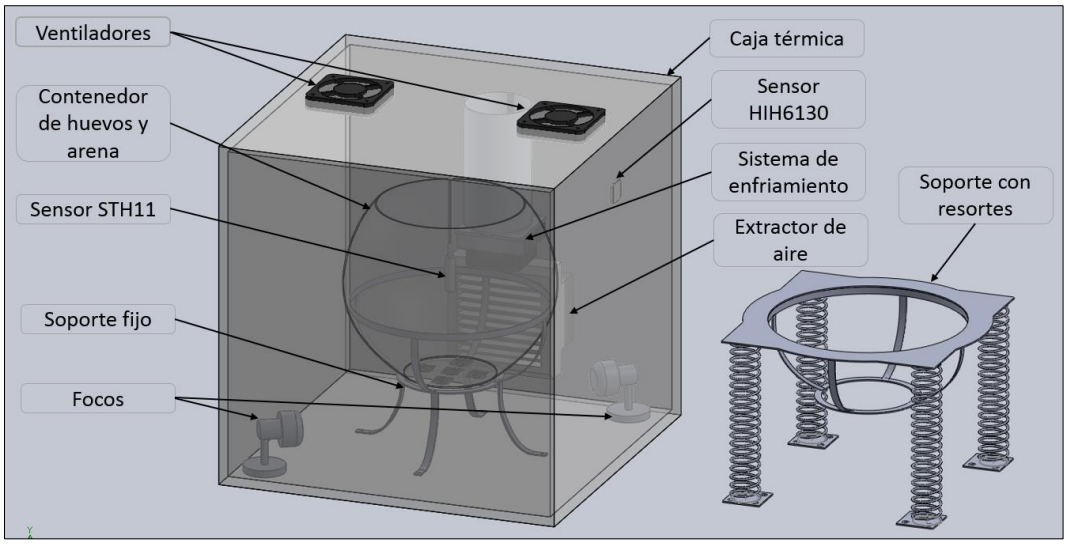


Figura 3.1 Diseño en CAD en Solid Works del sistema de incubación.

En la figura 3.1 se observa el sistema físico propuesto para la incubadora que consiste en una caja térmica, la cual sirve para aislar la temperatura del interior de la temperatura ambiente. Dentro de cada caja se coloca un contenedor de huevos y arena en su respectivo soporte (fijo o con resortes). Los contenedores de huevos y arena son

calentados por dos focos de halógeno, enfriados por un sistema de refrigeración Peltier y aireados por dos ventiladores y un extractor de aire.

Las cajas térmicas, como la que se muestra en la figura 3.2, fueron construidas con policarbonato celular transparente de 6mm de ancho. Las dimensiones de la caja térmica son: 50 cm de largo por 50 cm de ancho por 50 cm de profundidad. El policarbonato celular es un polímero termoplástico y dentro de sus usos y aplicaciones se encuentran: techos y muros de diversas instalaciones, ventanas, invernaderos, domos, [38].



Figura 3.2 Caja térmica fabricada con policarbonato celular.

El policarbonato celular fue seleccionado por sus características generales, algunas de ellas son las siguientes [39]:

- Protección UV
- Auto extinguibles
- Aislante térmico
- Soporta temperaturas de -40°C hasta 120°C
- 300 veces más resistente que el vidrio
- 30 veces más resistente que el acrílico puro
- Buen transmisor de luz
- Ligero

Las uniones de las placas de policarbonato celular se realizaron con ángulos de acrílico y pegamento para acrílico. También fueron usados molduras “u” para cerrar algunas celdas de las placas.

Es importante mencionar que las medidas tanto del contenedor de huevos y arena como de la caja térmica fueron pensadas para albergar una cantidad máxima de 120 huevos de tortuga golfina. Esta cantidad de huevos es la máxima recomendada por biólogos para evitar la compresión mecánica por el peso de los huevos que quedan en la parte superior del nido e imposibilitan su desarrollo [40].

Para la elaboración de los contenedores se llevó a cabo la fabricación de un molde del mismo material, como el que se puede observar en la figura 3.3. El contenedor de huevos y arena mostrado en la figura 3.4 fue hecho de plástico reforzado con fibra de vidrio. Su forma está basada en las cámaras de incubación que construyen las tortugas marinas.

La fibra de vidrio es un material que consta de numerosos filamentos extremadamente finos de vidrio. Éste es un material aislante y se puede usar como un agente de refuerzo con muchos productos poliméricos [41]. En este caso se utilizó la resina PP250. Las propiedades por la que se decidió hacer los contenedores de plástico reforzado con fibra de vidrio son las siguientes:

- Aislante térmico, acústico y eléctrico
- Material ligero
- Resistente
- Rígido
- Buen comportamiento frente a la corrosión y al desgaste



Figura 3.3 Molde de fibra de vidrio fabricado para el contenedor de huevos y arena.



Figura 3.4 Contenedor de huevos y arena fabricada en fibra de vidrio.

En la figura 3.5 se observan los soportes que fueron fabricados en solera de hierro. Se diseñaron dos clases de soportes. Un soporte con resortes de acero inoxidable, que sirve para absorber las perturbaciones durante el traslado de los huevos en cuatrimoto, pero debido a que los resortes sufren deformaciones con el peso y el paso del tiempo se optó por diseñar otro fijo, donde se coloca el contenedor una vez que los huevos ya no serán desplazados.



a) b)

Figura 3.5 Soportes a) fijo, y b) con resortes.

3.2 Sensores

El sensor para medir la humedad y temperatura dentro de la cámara de incubación es uno de los elementos más importantes de éste prototipo, por lo que para su selección se tomaron en cuenta algunas consideraciones. A pesar de que en el mercado existe

una variedad de sensores para suelos, todos son usados para tierras orgánicas, siendo usualmente sus aplicaciones en botánica, y agricultura. La arena es mucho más corrosiva que la tierra, compuesta principalmente por silicatos, lo que puede ocasionar una disminución en la vida útil del sensor o un mal comportamiento.

El sensor digital que se seleccionó es el que se muestra en la figura 3.6.



Figura 3.6 Sensor de humedad y temperatura SHT11.

Las características por las cuales fue seleccionado el sensor SHT11 son [42]: alta resolución, durable gracias a que cuenta con un recubrimiento de malla de cobre sinterizado, estable, usado a nivel industrial, resistente a la corrosión. En la tabla 3.1 encontramos algunas de sus especificaciones:

Rango de medición de temperatura (°C)	**Rango de medición de humedad relativa (%)**	**Exactitud de temperatura (°C)**	**Exactitud de humedad relativa (%)**	**Repetitividad de la temperatura (°C)**	**Repetitividad de la humedad relativa (%)**
-40 - 123	0 – 100	±0.4	±3	±0.1	±0.1

Tabla 3.1 Especificaciones del sensor de humedad y temperatura SHT11.

Este sensor es integrado por elementos sensitivos, un procesamiento de señales sobre una pequeña pista y provee una salida completamente calibrada. Un sensor capacitivo es usado para medir la humedad relativa mientras que la temperatura es medida con un sensor de banda prohibida. Ambos sensores están continuamente acoplados a un convertidor analógico-digital de 14 bits y a un circuito de comunicación serial [43].

Sin embargo la humedad relativa no sirve como parámetro para el control de la humedad de la arena. En el capítulo siguiente se ahondará en este problema.

En la figura 3.7 podemos observar la gráfica de la exactitud máxima de temperatura del sensor SHT11.

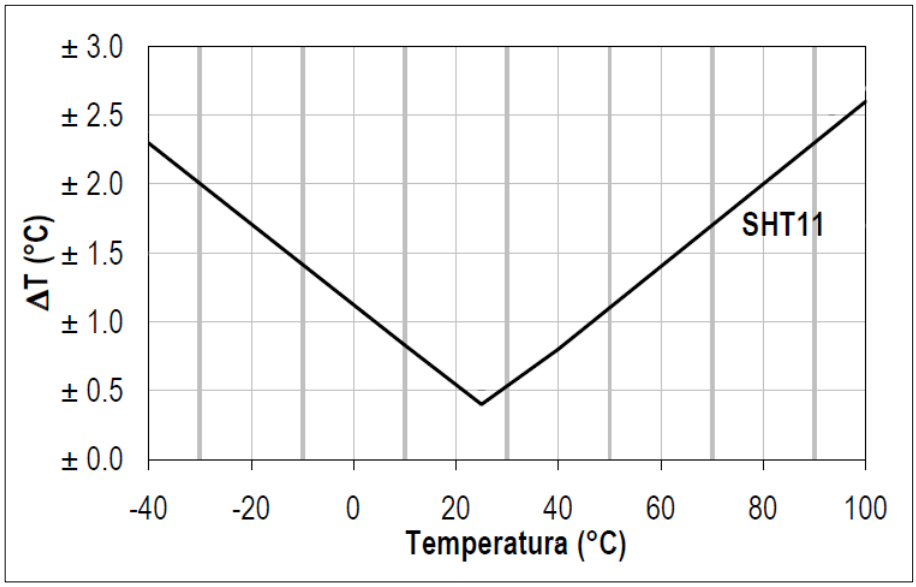


Figura 3.7 Máxima precisión de temperatura del sensor SHT11.

El segundo sensor de humedad y temperatura fue implementado en el diseño de la incubadora y utilizado exclusivamente para caracterizar el sistema. Su función en el sistema básicamente es el de adquirir los valores de humedad y temperatura en el ambiente para conocerlos. Es el sensor digital HIH-6130 que se puede observar en la figura 3.8.

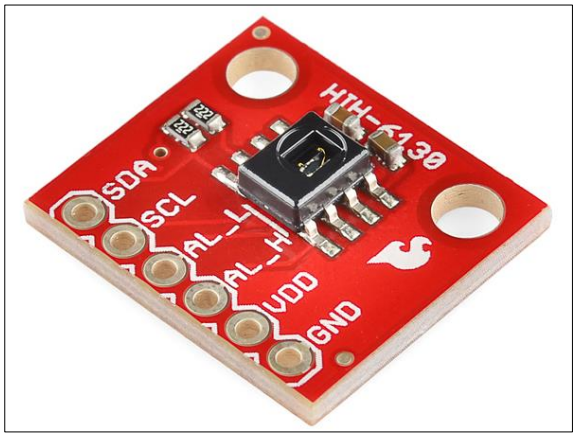


Figura 3.8 Sensor de humedad y temperatura HIH-6130.

Algunas de sus características se muestran en la tabla 3.2 [44].

Rango de medición de temperatura (°C)	**Rango de medición de humedad relativa (%)**	**Exactitud de temperatura* (°C)**	**Exactitud de humedad relativa (%)**
-25 - 85	10 - 90	1	4

Tabla 3.2 Especificaciones del sensor de humedad y temperatura HIH-6130. *Dentro del rango de temperatura compensada.

Ambas señales de los sensores son adquiridas con la tarjeta Arduino UNO y también cuentan con librerías de Arduino.

3.3 Actuadores

Cada incubadora cuenta con elementos calefactores, enfriadores, de ventilación y de humedad; a continuación se describirán.

3.3.1 Calefacción

En caso de que la cámara de incubación se encuentre por debajo de la temperatura deseada, los elementos calentadores entrarán en acción. Para incrementar la temperatura en la cámara de incubación se eligieron focos de halógeno de 50 Watts.

Cada incubadora cuenta con dos focos de halógeno como el que se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.9 Foco de halógeno para calefacción.

3.3.2 Enfriamiento

El problema del exceso de temperatura se contrarresta con la implementación de un serpentín de agua fría, el cual ayuda a disminuir la temperatura de la incubadora. Además de que la ventilación y humedad de la arena también favorece a que la cámara de incubación no eleve demasiado su temperatura.

El primer elemento del sistema de enfriamiento consiste en un serpentín de agua fría acoplado dentro del contenedor de fibra de vidrio. El serpentín, que se muestra en la figura 3.10, está hecho de tubo de cobre. A través de él circula agua fría que se hace circular con una bomba de agua de 12 V.



Figura 3.10 Serpentín de cobre.

El agua se encuentra almacenada en un recipiente de aluminio y se enfría gracias a una placa Peltier que se encuentra debajo del recipiente de aluminio. Una vez que está fría se hace circular a través del serpentín.

La placa Peltier, como la que se presenta en la figura 3.11, recibe este nombre debido al efecto Peltier, que se caracteriza por la aparición de una diferencia de temperaturas entre dos caras de un semiconductor cuando por él circula una corriente [45]. La placa logra enfriar el agua a 5°C.

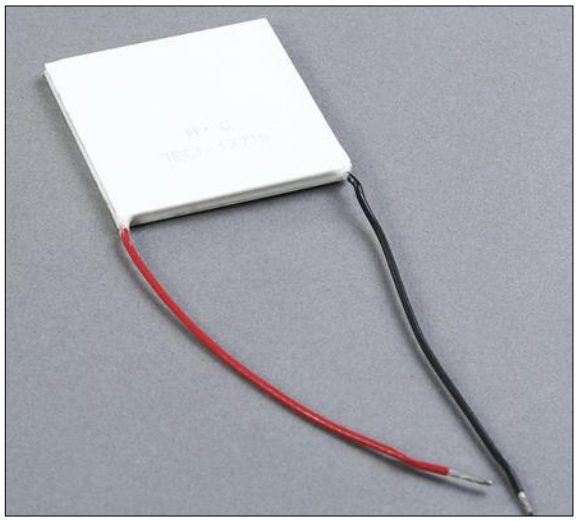


Figura 3.11 Placa Peltier.

El efecto termoeléctrico (efecto Peltier) es la conversión directa de una diferencia de potencial a una diferencia de temperaturas. Una celda Peltier tiene dos lados, y cuando una corriente eléctrica fluye a través del dispositivo, el calor se traslada de un lado al otro, de tal forma que un lado se vuelve más frío mientras el otro se vuelve más caliente.

Al lado caliente se le adhiere un disipador y un ventilador para mantenerlo a temperatura ambiente, mientras que el otro extremo disminuye su temperatura por debajo de la temperatura ambiente. Tanto la placa Peltier, como la bomba para hacer circular el agua y su ventilador funcionan a 12 volts.

3.3.3. Ventilación

La incubadora necesita estar en ventilación constante por dos razones. La primera es que los huevos consumen oxígeno y liberan bióxido de carbono, por lo cual renovar el aire dentro de la incubadora resulta de suma importancia. La segunda es que esta ventilación también ayuda a disipar el calor dentro de la incubadora. Para esto se usaron dos ventiladores y un extractor de aire de corriente alterna, como los que se muestran en la figura 3.12 y 3.13 respectivamente.

Fueron necesarios dos ventiladores para asegurar que el nido se encuentre bien ventilado y fueron colocados en la tapa superior de la caja de policarbonato celular. Por otra parte un solo extractor de aire es necesario para



Figura 3.12 Ventilador de corriente alterna.

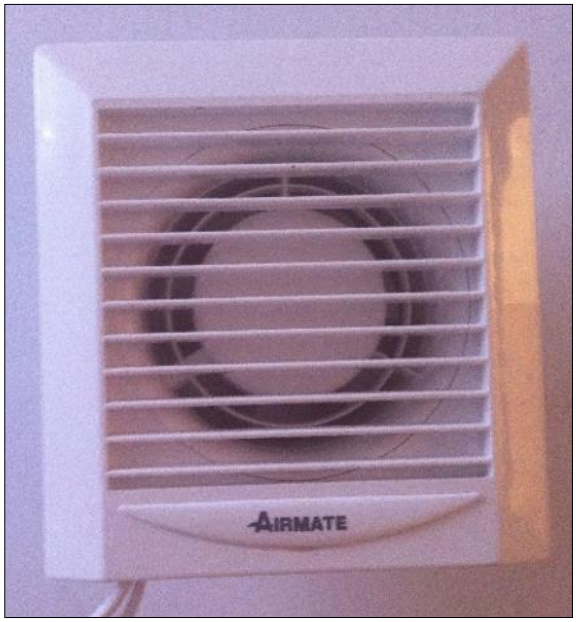


Figura 3.13 Extractor de aire.

3.3.4 Humedad

Para mantener la arena húmeda se utiliza una bomba de agua sumergible de corriente alterna, como la mostrada en la figura 3.14. La bomba de agua es colocada dentro de una cubeta con agua, fuera de la caja térmica. También se ocupa una manguera de plástico de 1.5 m de largo.

En la tabla 3.3 se presentan las características de la bomba de agua.

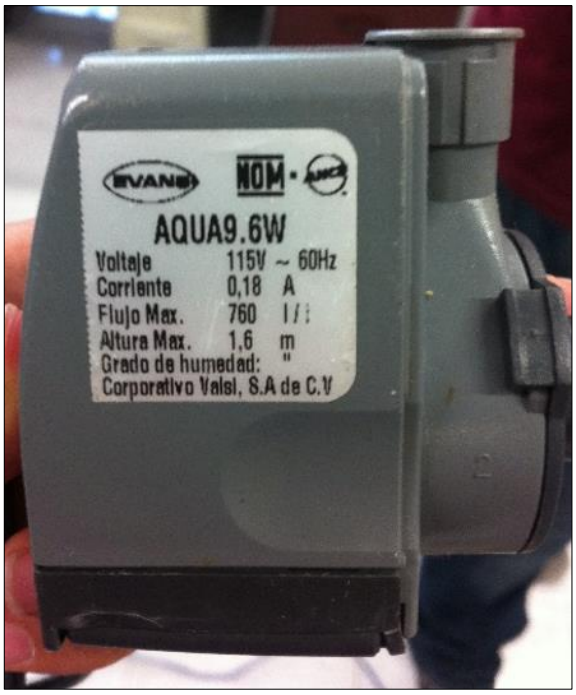


Figura 3.14 Bomba de agua sumergible.

Característica	**Valor**
Marca	Evans
Voltaje	115 V ~ 60 Hz
Corriente	0.18 A
Flujo máximo	760 l
Altura máxima	1.6 m

Tabla 3.3 Características de la bomba de agua sumergible.

Se integraron todos estos actuadores al sistema de la incubadora. Para su montaje se utilizaron tornillos y tuercas con tratamiento galvánico. En la figura 3.15 se presenta una fotografía del interior de la incubadora y en las figuras 3.16 y 3.17 se presentan fotografías del exterior de la incubadora.

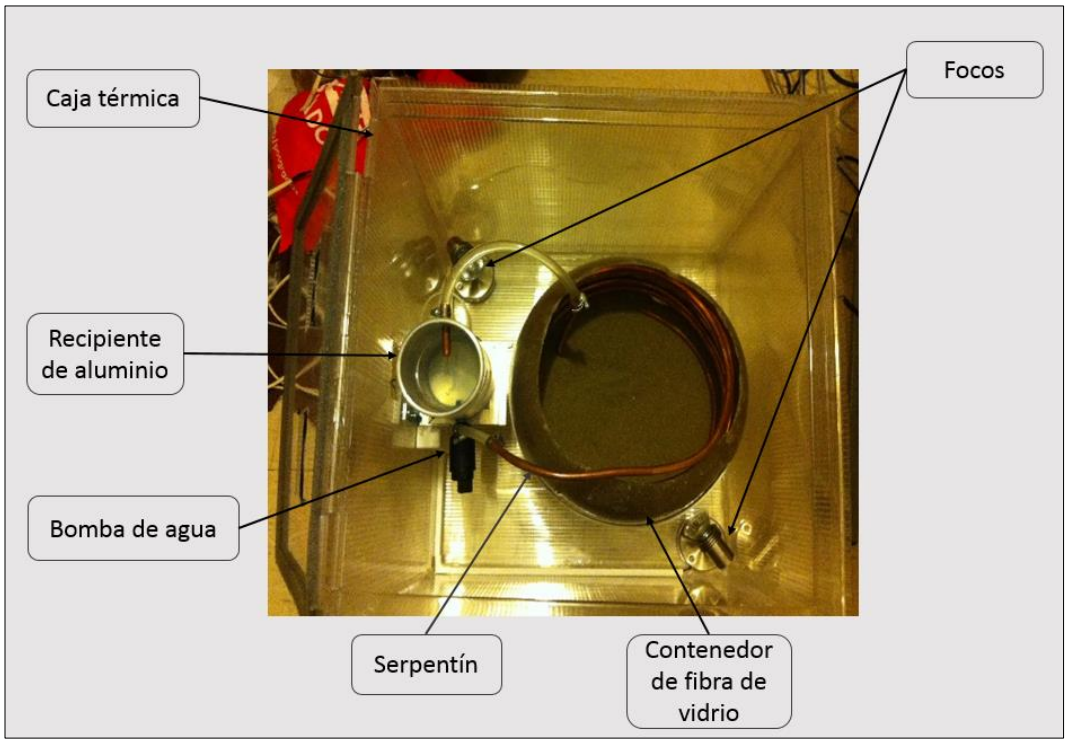


Figura 3.15 Interior de la incubadora.

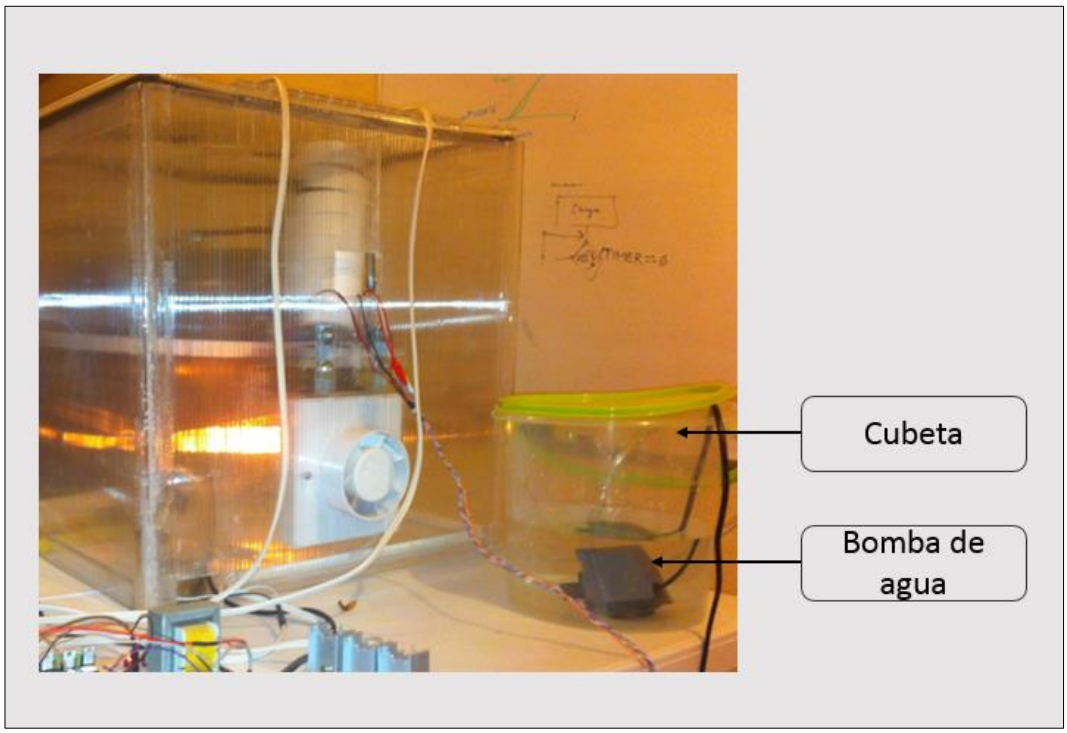


Figura 3.16 Exterior de la incubadora y bomba de agua.

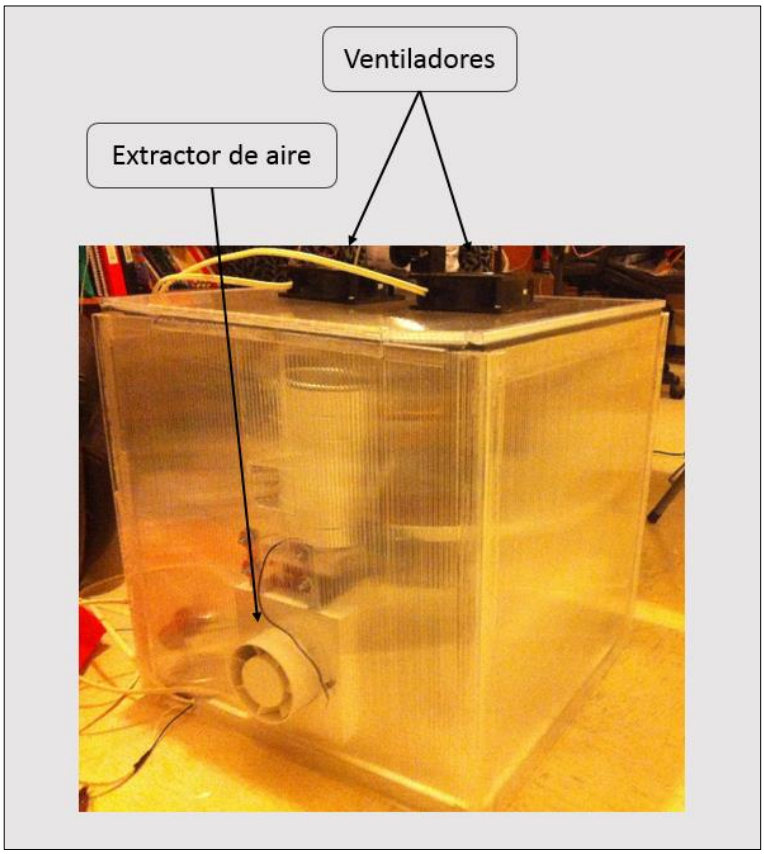


Figura 3.17 Exterior de la incubadora.

3.4 Tarjetas electrónicas

La incubadora cuenta con diferentes tarjetas electrónicas. Una tarjeta de potencia para los focos, ventiladores y la bomba para humidificar el nido; una tarjeta de potencia para el sistema de refrigeración que incluye la placa Peltier, el ventilador y la bomba para hacer circular el agua del serpentín; una tarjeta detectora del cruce por cero de la toma de corriente y una tarjeta que funciona como driver de potencia para la intensidad de los focos. Todas estas tarjetas fueron diseñadas en el software EAGLE. Además también se cuenta con una tarjeta comercial Arduino UNO para la adquisición de datos y control así como una pantalla micro LCD PICASO para la interfaz con el usuario. Se decidió generar la interfaz con el usuario mediante una tarjeta, por cuestiones de portabilidad de la incubadora, a pesar de que la incubadora pudiera conectarse con una computadora para procesar y adquirir la información de los sensores e incluso contar ahí mismo con una interfaz de usuario.

3.4.1 Tarjetas electrónicas de potencia

El propósito de la primera tarjeta de potencia es mandar una señal de activación independiente a cada uno de los siguientes elementos: focos, ventiladores, extractor de aire y la bomba de agua sumergible. La activación se produce al traducir un 5 o 0 volts (1 o 0 lógico) a un conectado o desconectado de la toma de corriente (120V@60Hz). El elemento que se encarga de hacer esta operación es el optocoplador MOC3021.

Los circuitos electrónicos de potencia para los focos de halógeno se implementaron utilizando el circuito de la figura 3.18 del optocoplador MOC3021 en su configuración de carga resistiva.

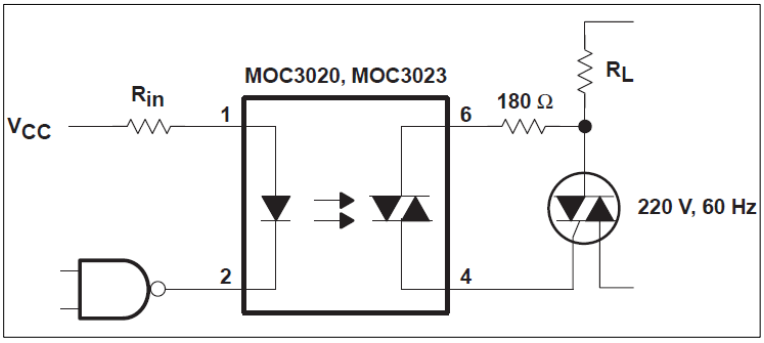


Figura 3.18 Diagrama eléctrico del optocoplador MOC3021 para cargas resistivas (focos).

Los circuitos electrónicos de potencia para los ventiladores, extractor de aire, así como el motor de agua se hicieron utilizando el circuito del optocoplador MOC3021 en su configuración de carga inductiva, como en el circuito de la figura 3.19.

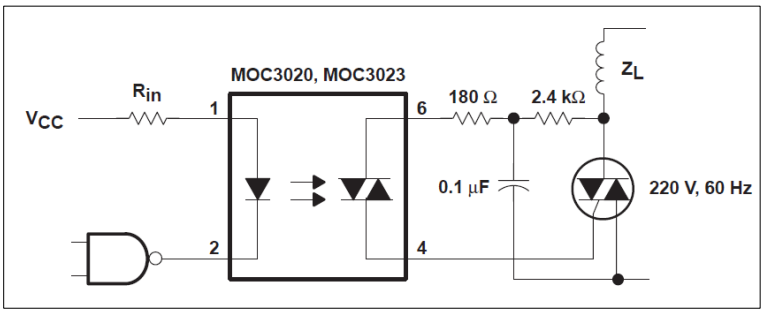


Figura 3.19 Diagrama eléctrico del optocoplador MOC3021 para cargas inductivas (ventiladores y bombas).

Se integraron 6 circuitos MOC3021; 2 en su configuración resistiva para cada foco y 4 en su configuración inductiva para los dos ventilados, extractor de aire y bomba de agua. En las figuras 3.20 y 3.21 se pueden observar el diagrama eléctrico y de

conexiones respectivamente El producto final de la tarjeta quedó como se muestra en la figura 3.22 [46].

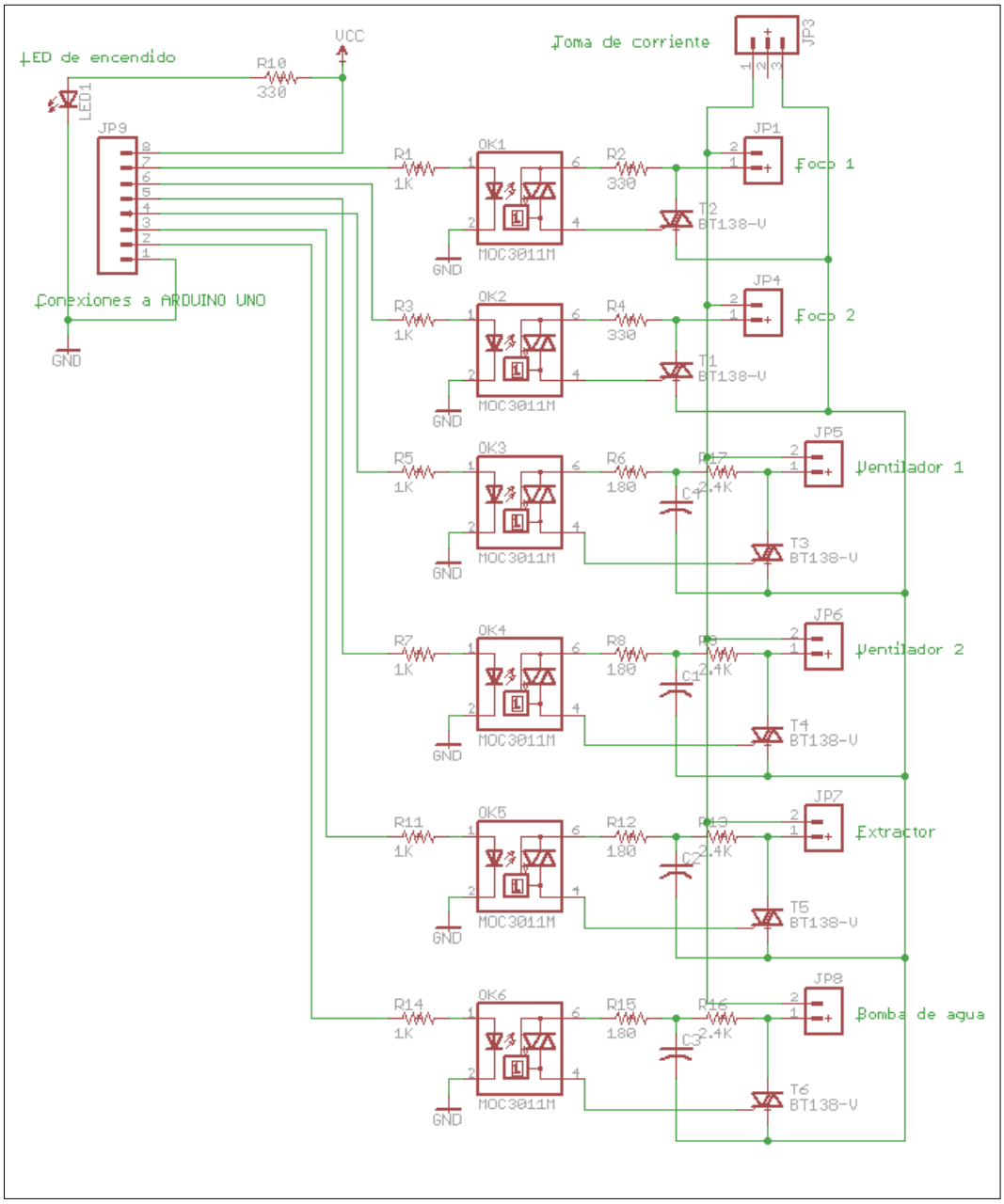


Figura 3.20 Diagrama eléctrico en EAGLE de la tarjeta de potencia 1.

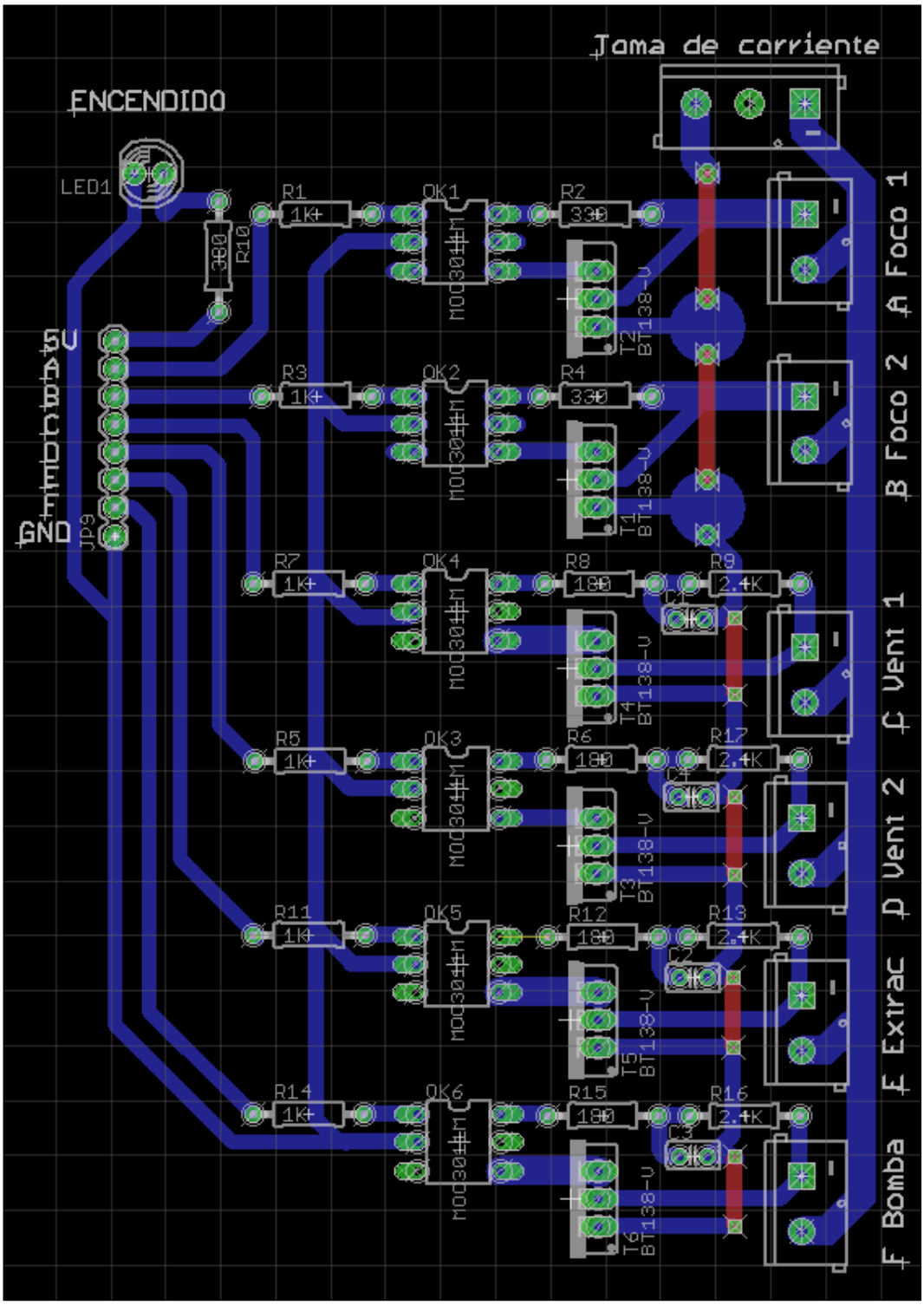


Figura 3.21 Diagrama de las conexiones físicas de la tarjeta de potencia 1.

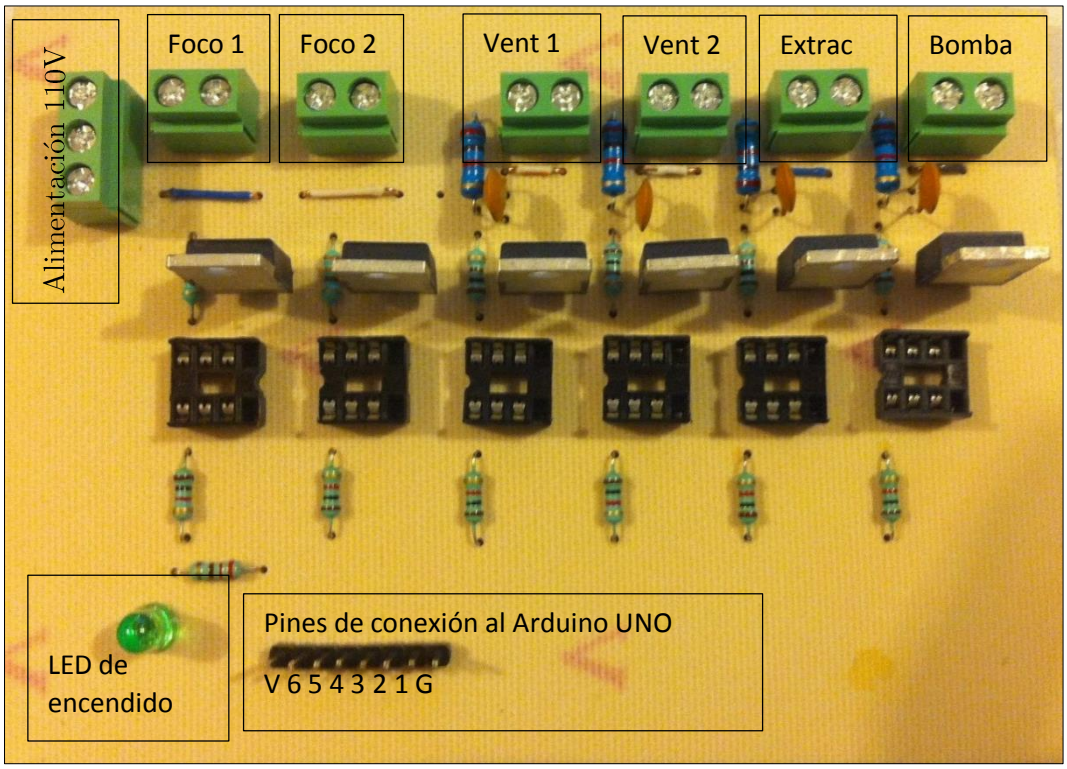


Figura 3.22 Tarjeta física de potencia 1.

Como se muestra en el diagrama eléctrico de la figura 3.22, la tarjeta de potencia tiene pines que servirán para realizar la conexión a la tarjeta Arduino UNO, a excepción de los pines 5 y 6; estos dos pines que corresponden a los focos, van conectados al circuito driver de potencia que se describirá más adelante. La tarjeta es alimentada con la toma de corriente de 110V AC y cuenta con un LED que indica encendido.

La segunda tarjeta de potencia se diseñó utilizando el circuito básico en configuración de interruptor de un transistor NPN [47], se trata del TIP31C [48]. Esta placa contiene 3 circuitos de este tipo, de los cuales uno es para la placa Peltier, otro para el ventilador y el tercero para la bomba de agua del serpentín.

El diagrama eléctrico se muestra en la figura 3.23 así como el diagrama de conexiones en la figura 3.24. La placa final quedó como en la figura 3.25, como se puede observar fue necesario utilizar disipadores de calor debido a que los transistores se sobrecalentaban por la potencia que disipan.

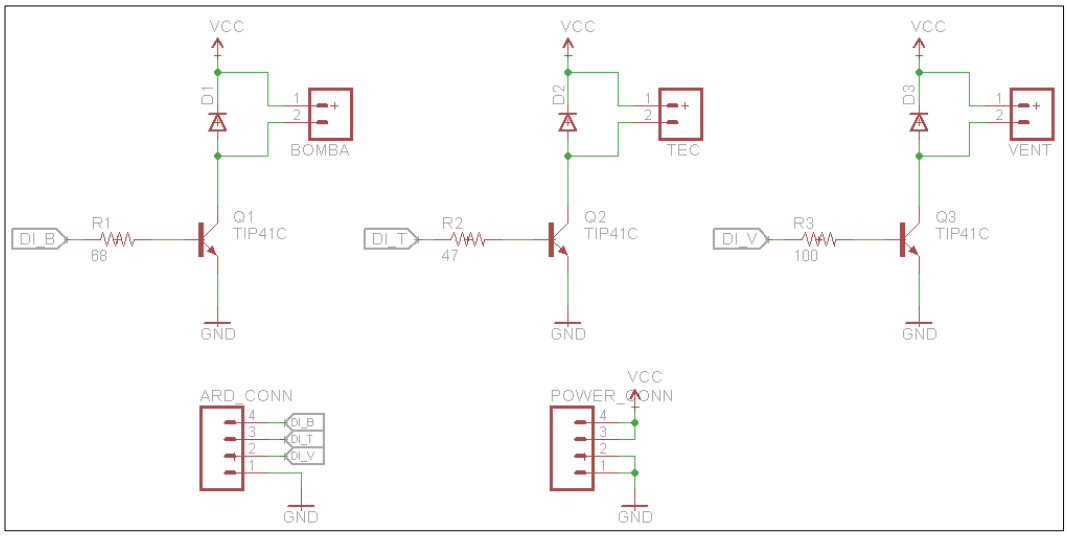


Figura 3.23 Diagrama eléctrico en EAGLE de la tarjeta de potencia para el sistema de refrigeración.

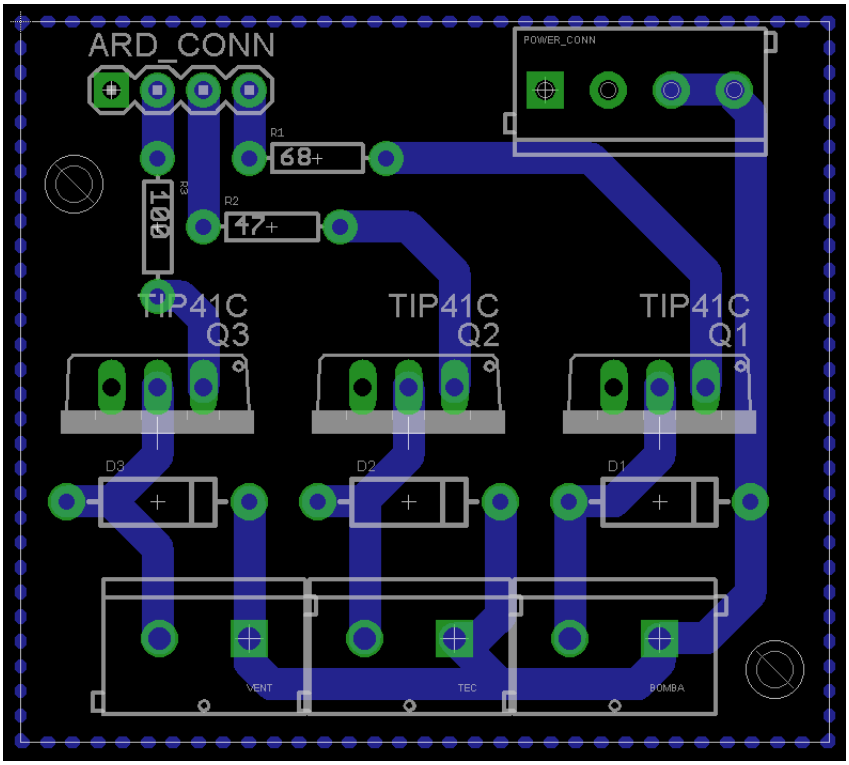


Figura 3.24 Diagrama de las conexiones físicas de la tarjeta de potencia para el sistema de refrigeración.

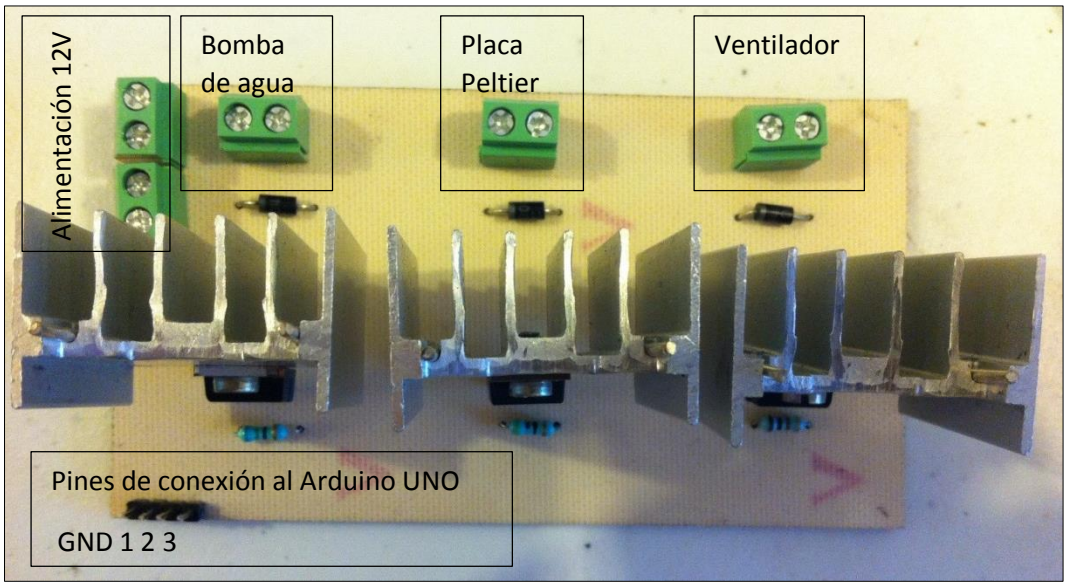


Figura 3.25 Tarjeta física de potencia 2.

3.4.2 Tarjetas electrónicas de adquisición de datos, control e interfaz de usuario

Con el fin de variar la intensidad lumínica de los focos, se diseñó un driver de potencia que está compuesto por dos circuitos: un detector de cruce por cero y un sistema mínimo para un microcontrolador PIC16F84A. En el diagrama a bloques de figura 3.26 podemos observar como el Arduino UNO entrega la señal de control al driver de potencia que se encarga de hacer las operaciones necesarias para variar el porcentaje de la señal sinusoidal de la toma de corriente y finalmente deja pasar la señal a la etapa de potencia de los focos.

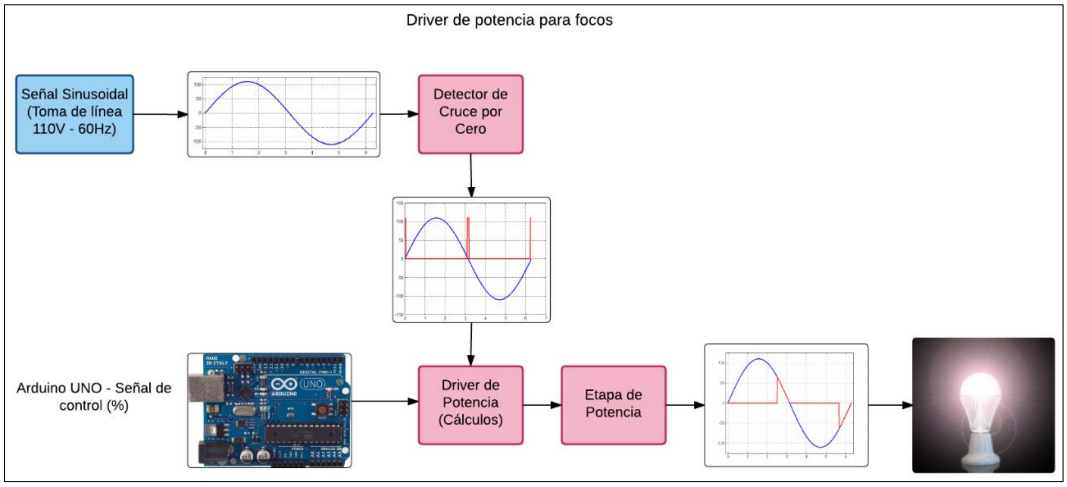


Figura 3.26 Diagrama a bloques del funcionamiento del driver de potencia para los focos.

El detector de cruce por cero es utilizado para que el driver determine el instante en que empieza la señal sinusoidal de la toma de línea. El esquema del detector de cruce por cero se muestra en la figura 3.27, en la figura 3.28 se muestra el diagrama de conexiones. La tarjeta física quedó como en la figura 3.29. Su función consiste en la generación de pulsos cada vez que la señal de toma de corriente cruza por cero. De este modo el driver de potencia puede realizar las operaciones para dejar pasar el porcentaje necesario de la señal.

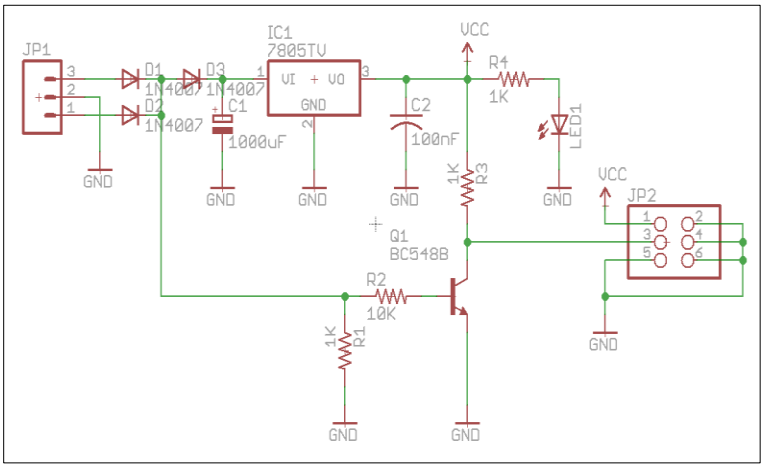


Figura 3.27 Diagrama eléctrico en EAGLE del detector de cruce por cero.

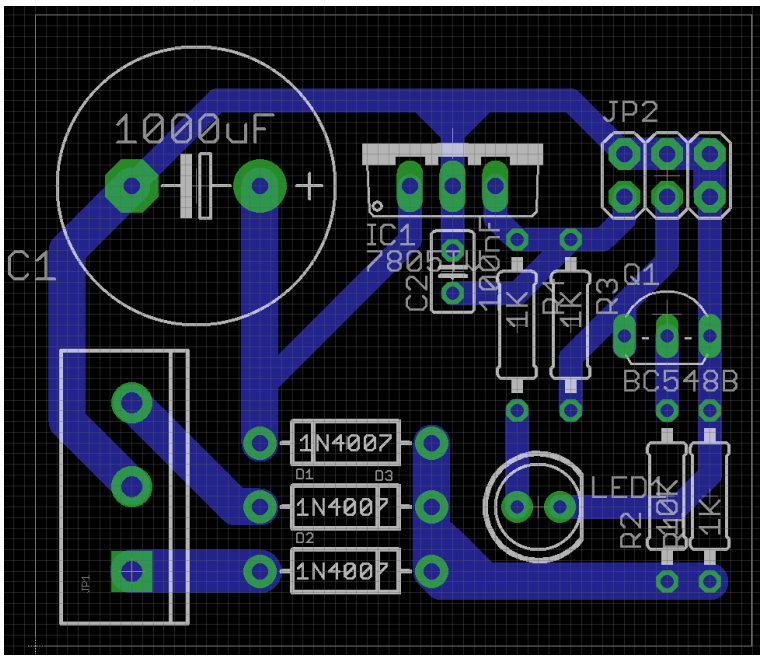


Figura 3.28 Diagrama de conexiones del detector de cruce por cero.

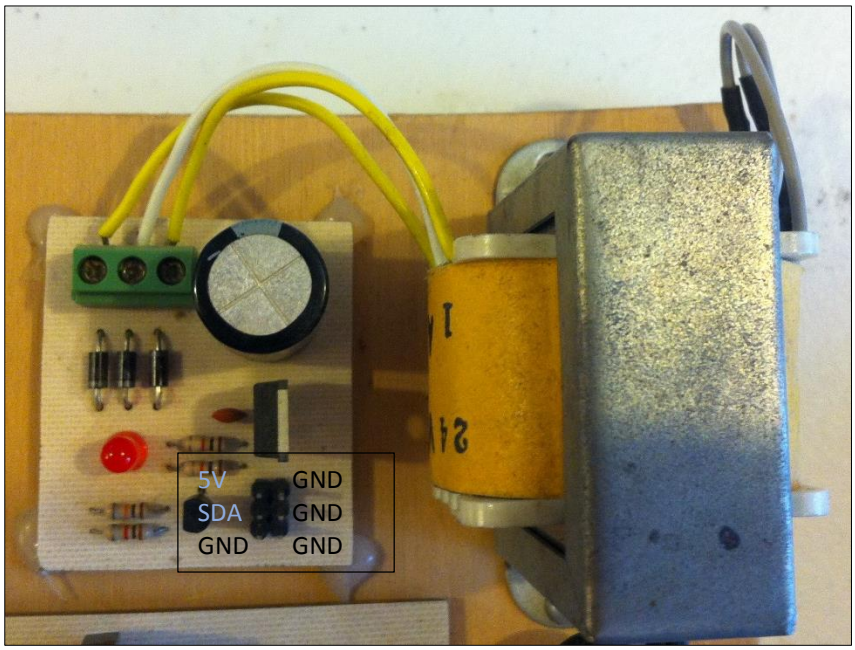


Figura 3.29 Tarjeta física del detector de cruce por cero.

El diagrama eléctrico del circuito con el multiplexor de 8 bits para el bus I2C y el microcontrolador PIC16F84A PIC se observa en la figura 3.30, en la figura 3.31 se puede ver el diagrama de conexiones y en la figura 3.32 se muestra cómo quedó implementada la tarjeta.

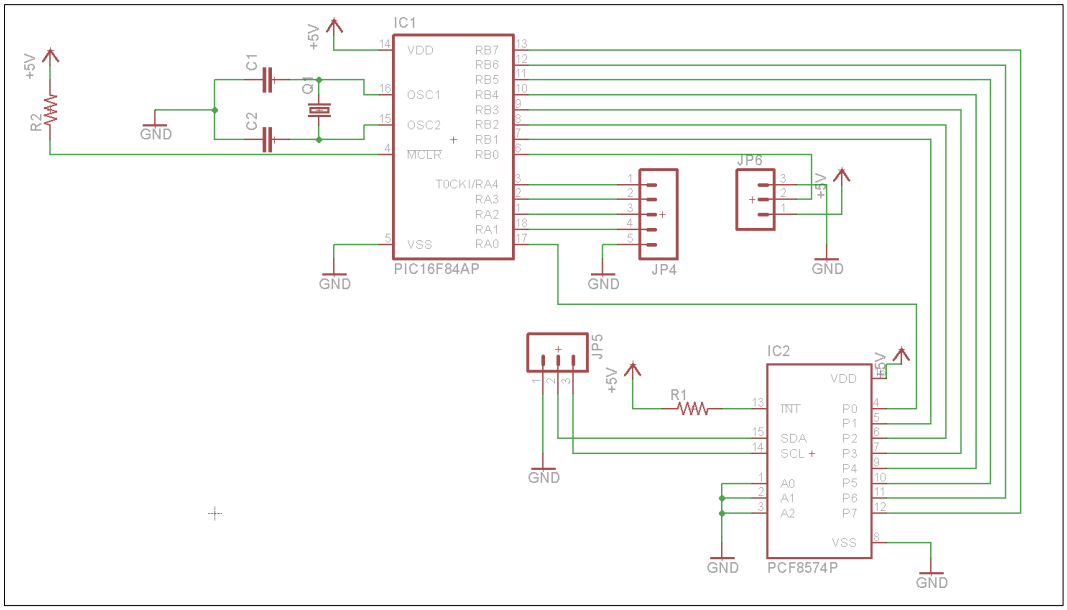


Figura 3.30 Diagrama eléctrico del driver de potencia.

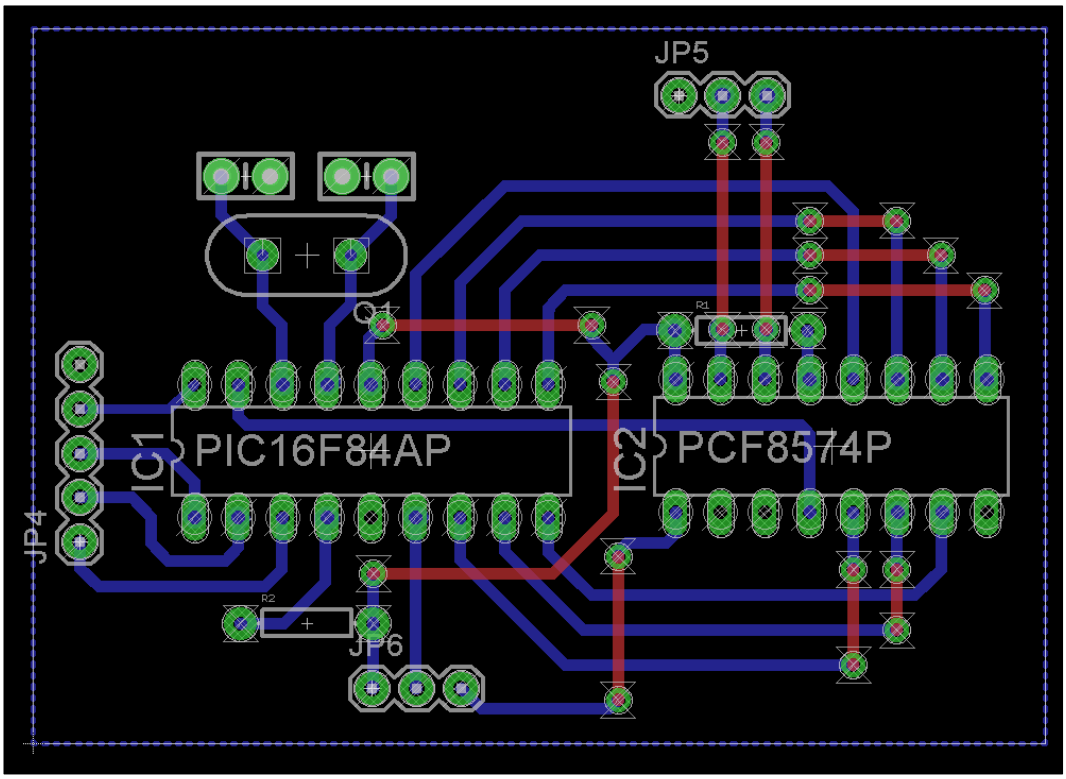


Figura 3.31 Diagrama de conexiones del driver de potencia.

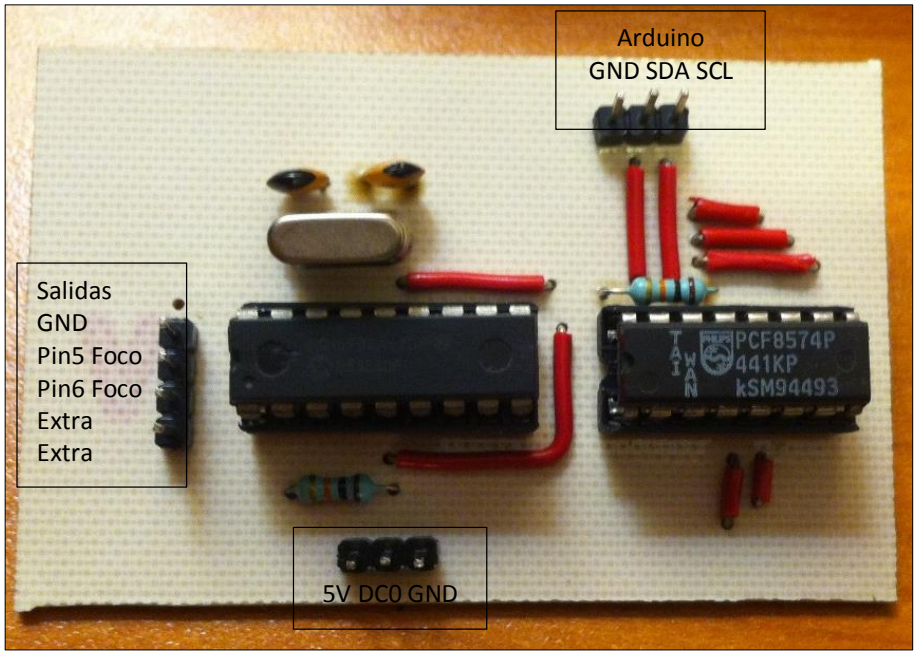


Figura 3.32 Tarjeta física del driver de potencia.

La tarjeta electrónica que se usa para realizar la adquisición de datos y el algoritmo de control es la tarjeta Arduino UNO, como la mostrada en la figura 3.33. Esta tarjeta utiliza un microcontrolador ATmega328. Las principales características de su selección fueron el bajo costo y que es de software libre. Su costo, de no más de $350, es una gran ventaja frente a otras tarjetas ya que resulta primordial para que el costo total de la incubadora no sea elevado y siendo de software libre significa que a grandes rasgos podemos ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software de manera libre.



Figura 3.33 Tarjeta electrónica Arduino UNO.

Algunas otras características técnicas de la tarjeta Arduino UNO son las que se presentan en la tabla 3.4 [51].

Característica	**Valor**
Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (límite)	6-20 V
Pines digitales I/O	14 (6 de ellos entregan PWM)
Pines digitales con PWM I/O	6
Pines de entrada analógica	6
Corriente DC en cada pin I/O	20 mA
Corriente DC en pines de 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328P) de los cuales 0.5 son usados para el gestor de arranque
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidad de reloj	16 MHz

Tabla 3.4 Características técnicas de la tarjeta Arduino UNO.

Además para agilizar las conexiones I2C de los sensores a la tarjeta Arduino se utilizó una placa GROVE de prototipado rápido como la mostrada en la figura 3.34. Esta placa, entre otros elementos cuenta con 4 conexiones I2C.

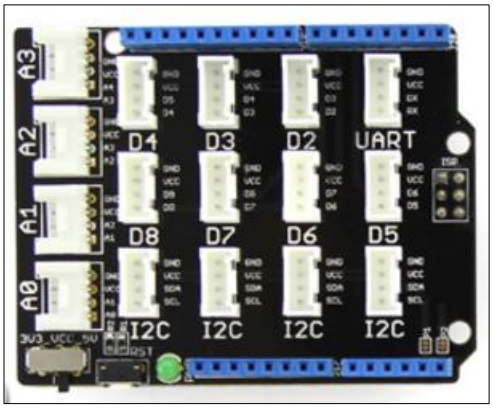


Figura 3.34 Placa Grove de prototipado rápido.

Otro elemento importante para la implementación del control es un reloj de tiempo real DS1307 como el mostrado en la figura 3.35. Con una comunicación I2C, este reloj provee la información de segundos, minutos horas, día, fecha, mes y año. Este reloj también sirve para llevar la cuenta de los días que los huevos han sido incubados y dicha información sea mostrada en la interfaz de usuario.

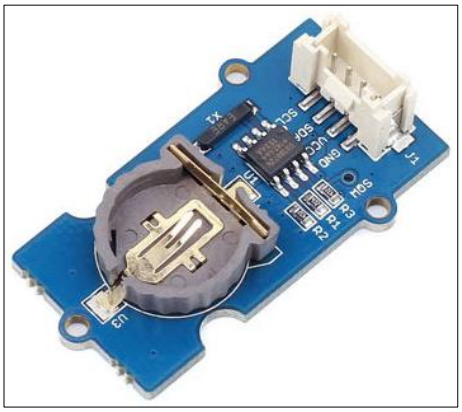


Figura 3.35 Reloj de tiempo real DS1307.

Por último, una pantalla micro LCD de la marca 4D Systems es utilizada para crear la interfaz de usuario. Esta pantalla µLCD-32PTU, como la mostrada en la figura 3.36, cuenta con un panel táctil resistivo de 3.2 pulgadas, un amplificador de audio y bocina, conector para tarjeta micro-SD y un grupo de pines de propósito general, incluyendo comunicación I2C y serial. Esta pantalla permite el diseño de rápidas y sencillas interfaces de usuario [52].



Figura 3.36 Pantalla µLCD-32PTU.

Capítulo 4. Diseño e implementación del control e interfaz de usuario

En este capítulo se describirá la metodología utilizada para la implementación de un control PID y su sintonización para el control de temperatura de los elementos calentadores, un control on-off de temperatura para los elementos enfriadores, y un control on-off de lazo abierto para la humedad; así como la interfaz de usuario.

El diagrama general a bloques del sistema se muestra en la figura 4.1.

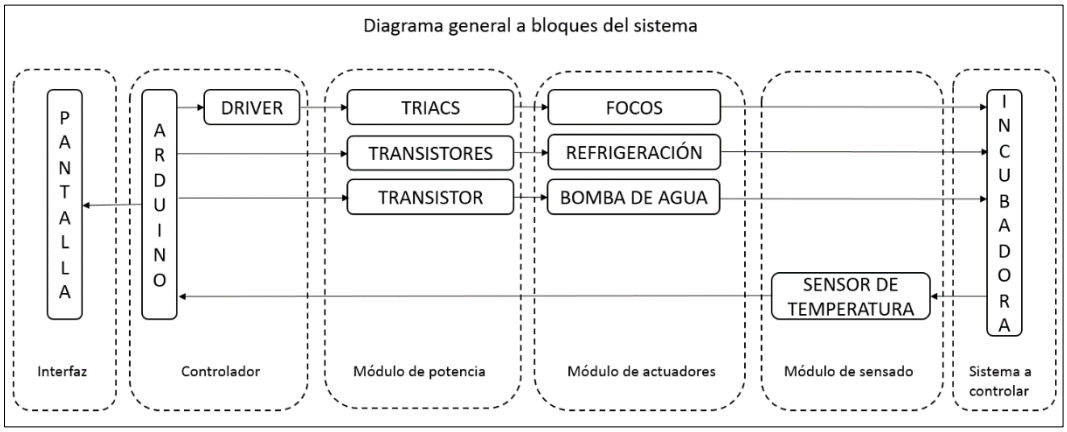


Figura 4.1 Diagrama general a bloques del funcionamiento del sistema.

La temperatura del nido será detectada por el sensor STH11 el cual envía estos datos a la tarjeta de control Arduino UNO. El Arduino envía ésos datos a la pantalla para que puedan ser visualizados por el supervisor y a su vez realiza las operaciones de control. El valor de referencia de temperatura es establecido en el programa de la tarjeta Arduino por lo que no necesita ser modificada por el usuario. En caso de que el nido necesite elevar su temperatura entonces el Arduino arroja la señal de control al driver de potencia, la cual está dada como un valor entre cero y uno. Este valor representa el porcentaje de la señal sinusoidal de la toma de línea que se debe de activar. El driver de potencia que incluye la tarjeta detectora de cruce por cero realizan

las operaciones necesarias para que la etapa de potencia deje pasar la cantidad de señal sinusoidal indicada por el Arduino. Si el nido requiere una temperatura menor, entonces el Arduino arroja la señal de control para activar el sistema enfriador y lo apaga cuando el sistema alcance la temperatura deseada. El Arduino también es el encargado de humidificar al nido diariamente, este control es de lazo abierto puesto que no se sensa la humedad.

4.1 Control de temperatura

El control de temperatura fue dividido en dos, como se muestra en la figura 4.2. Para los elementos calentadores se trata de un control de tipo Proporcional Integral Derivativo, específicamente uno de tipo PI. Mientras que para los elementos enfriadores se trata de un control on-off.

La decisión de dividir el control de temperatura en dos radica en la naturaleza de los actuadores, se determinó el usar un control de tipo PID puesto que es posible variar la intensidad lumínica de los focos, sin embargo el sistema de enfriamiento únicamente puede ser prendido o apagado y por este motivo su control es on-off.

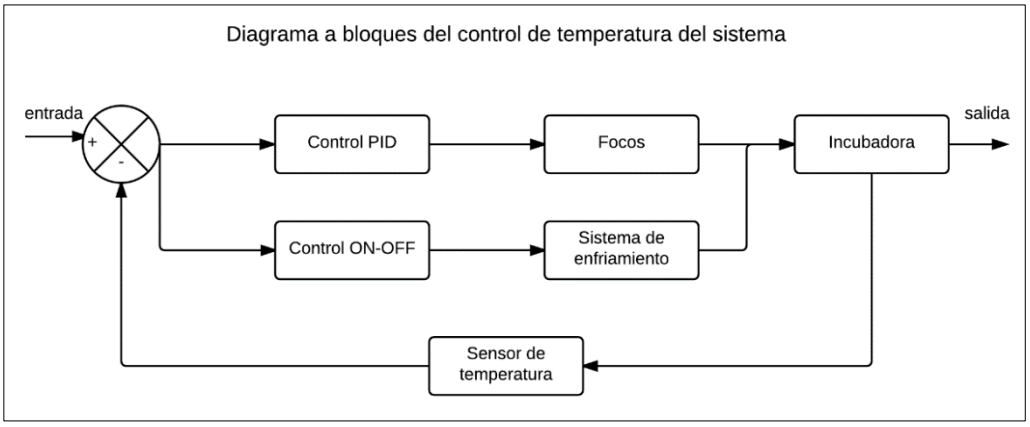


Figura 4.2 Diagrama a bloques del control de temperatura para la incubadora.

4.1.1 Conceptos básicos de los controladores on-off y PID

A continuación se explicará brevemente algunos conceptos básicos de los controladores on-off y PID.

La idea de retroalimentación para hacer acciones correctivas basadas en la diferencia entre el valor deseado y el actual de una cantidad puede ser implementada de muchas maneras. Los beneficios de la retroalimentación pueden ser obtenidos mediante simples leyes de control como un control on-off, control proporcional y un control proporcional-integral-derivativo.

Un mecanismo simple de retroalimentación puede ser descrito como a continuación:

$$u = \begin{cases} u_{max} \; si \; e > 0 \\ u_{min} \; si \; e < 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

donde la señal de error $e = r - y$ es la diferencia entre la señal de referencia r y la salida del sistema y y u es la señal de control. Esta ley de control implica que siempre se use una acción correctiva máxima.

La retroalimentación en la ecuación (4.1) es llamado control on-off. Una de sus ventajas principales es que es simple y no hay necesidad de elegir parámetros. El control on-off a menudo tiene éxito en mantener la variable del proceso cerca de la referencia, tal como el uso de un simple termostato para mantener la temperatura de un cuarto. Típicamente resulta en un sistema donde la variable controlada oscila, lo cual es a menudo aceptable si la oscilación es lo suficientemente pequeña.

Nótese que en la ecuación (4.1) la variable de control no está definida cuando el error es cero. Es común hacer modificaciones introduciendo una zona muerta o bien histéresis.

La razón por la cual un control on-off a menudo genera un incremento de oscilaciones es que el sistema reacciona de manera exagerada a pequeños cambios en el error, que hace que la variable actuadora cambie en un rango completo. Este efecto es evitado en un control proporcional, donde la característica del controlador es proporcional al error de control para pequeños errores. Esto puede ser expresado con la ley de control

$$u = \begin{cases} u_{max} \; si \; e \geq e_{max} \\ k_p e \; si \; e_{min} < e < e_{max} \\ u_{min} \; si \; e \leq e_{min,} \end{cases} \quad (4.2)$$

Donde k_p es la ganancia controladora, $e_{min} = u_{min}/k_p$ y $e_{max} = u_{max}/k_p$. El intervalo $(e_{min,} e_{max})$ es llamado banda proporcional debido a que el comportamiento del controlador es lineal cuando el error está dentro del siguiente intervalo:

$$u = k_p(r - y) = k_p e \quad si \quad e_{min} \leq e \leq e_{max} \quad (4.3)$$

Mientras que existe una vasta mejora sobre el control on-off, el control proporcional tiene la desventaja de que la variable del proceso a menudo se desvía del valor de referencia. En particular, si algún nivel de la señal de control es requerido por el sistema para mantener el valor deseado, entonces se necesita tener $e \neq 0$ para generar la entrada requerida.

Esto puede ser evitado haciendo la acción de control proporcional a la integral del error:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau)d\tau \quad (4.4)$$

Esta forma de control es llamado control integral, y k_i es la ganancia integral. A través de simples argumentos se puede mostrar que un control con acción integral tiene cero error en estado estacionario. La trampa está en que no siempre hay un estado estacionario ya que el sistema puede estar oscilando.

Una mejora adicional es utilizada para aportar al controlador una habilidad anticipativa usando una predicción del error. Una simple predicción es dada por una extrapolación lineal

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.5)$$

La cual predice el error en T_d instantes de tiempo adelante. Combinando el control proporcional, integral derivativo, se obtiene un controlador que puede ser expresado matemáticamente como

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.6)$$

La acción de control es por consiguiente la suma de los tres términos: el pasado representado por la integral del error, el presente representado por el término proporcional y el futuro representado por la extrapolación lineal del error (término derivativo). Esta forma de retroalimentación es llamado controlador proporcional-integral-derivativo (PID) y su acción es ilustrada en la figura 4.3.

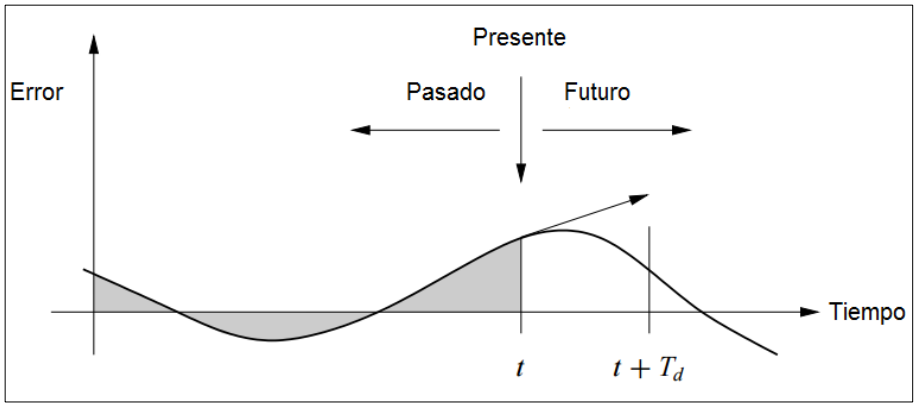


Figura 4.3 Acción de un control PID.

Al instante de tiempo t, el término proporcional depende del valor en el instante del error. La parte integral de la retroalimentación está basado en la integral del error hasta el tiempo t (parte sombreada). El término derivativo provee una estimación del crecimiento o decaimiento del error sobre el tiempo por medio de una mirada en la tasa del cambio del error. T_d representa la cantidad aproximada de tiempo en el cual se espera que el error aparezca [53].

4.1.2 Caracterización del sistema

La caracterización del sistema es necesaria para la implementación del control PID para los elementos calentadores por lo que se prosiguió a obtener su función de transferencia, la cual se obtuvo analizando la respuesta a una entrada escalón. En este caso los focos al 100% de su intensidad lumínica representan la entrada escalón.

En general, un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse de muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva [54].

El comportamiento del sistema varía dependiendo de varios factores, siendo estos principalmente el tipo de arena, la cantidad de arena, el tipo de huevos de tortuga marina y el número de huevos y la temperatura ambiental de la zona. Por este motivo se puede obtener un gran número de modelos matemáticos del sistema.

Se optó por obtener la función de transferencia para el caso en que es usada arena de playa, como la mostrada en la figura 4.4. Se ocuparon 100 bolas de poliestireno (unicel) que simulan al máximo número de huevos de tortuga golfina. A continuación se describirá el procedimiento para la obtención de la función de transferencia.



Figura 4.4 Arena recolectada en las playas de Oaxaca.

Se preparó el contenedor llenándolo de arena de playa y se colocó el sensor SHT11 en el centro del mismo, sumergido en la arena.

También se utilizó un sensor de humedad y temperatura ambiental HIH-6130 para medir la temperatura dentro de la caja térmica y además se utilizó uno extra para medir la temperatura del ambiente. Este sensor extra se utilizó únicamente para la caracterización del sistema y no está contemplado en el diseño de las incubadoras.

Se analizó la respuesta de la incubadora a una entrada escalón. El escalón representa el calor generado por dos focos de halógeno. Se utilizó la tarjeta Arduino UNO para adquirir los datos de los sensores y fueron desplegados en el monitor serial.

La prueba duró 13 horas y 32 minutos. El tiempo de muestreo de la caracterización fue de 1 minuto, dando como resultado un total de 812 muestras. Más tarde se utilizó la información adquirida por la tarjeta Arduino UNO para graficarla en MATLAB. Los datos obtenidos son los observados en la figura 4.5.

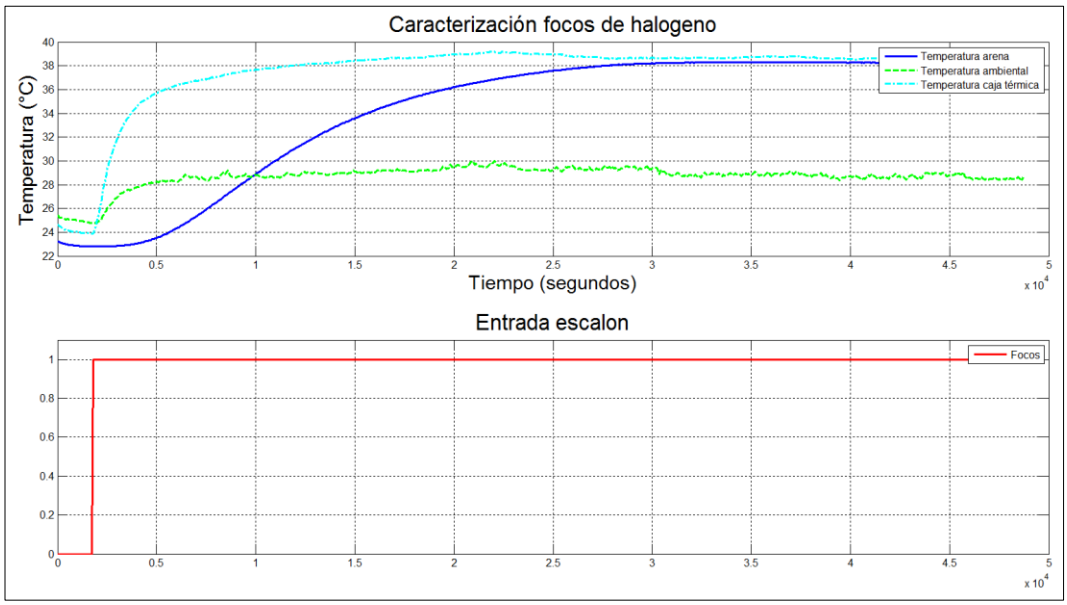


Figura 4.5 Gráfica de la respuesta del sistema de la incubadora a entrada escalón.

Como se observa en la gráfica anterior, la temperatura ambiental, de color verde y discontinua (- -), en general se mantuvo con variaciones que van de los 28°C a los 30°C. La temperatura dentro de la caja térmica, de color cian y discontinua (- .), fue incrementando muy rápido y alcanzó más de 38°C y la temperatura del contenedor con arena, de color azul y continua, fue incrementando gradualmente hasta alcanzar poco más de 38°C.

En la figura 4.6 sólo se incluye la medición de temperatura del contenedor de arena. Esta medición es la más importante, ya que con esta información encontraremos la función de transferencia del sistema.

Cabe aclarar que tanto el control de humedad como el de temperatura están destinados al contenedor de huevos y arena.

Es de esperarse que el tiempo de respuesta del sistema sea muy lento, esto sucede porque el calor que emiten los focos fluye por convección primero a través del material y después de la arena y este proceso resulta muy gradual y lento. Sin embargo este comportamiento es adecuado para los huevos, ya que no deben estar expuestos a cambios bruscos en general.

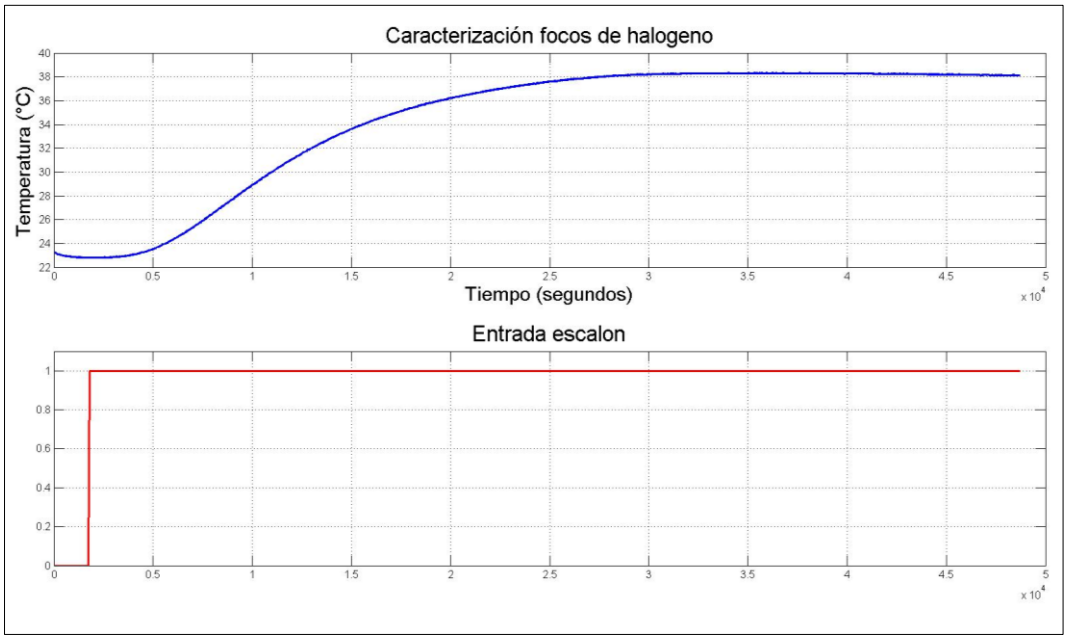


Figura 4.6 Gráfica de la respuesta del sistema de la incubadora a una entrada de tipo escalón para arena tipo playa.

Después, utilizando la librería de MATLAB llamada System Identification se calculó la función de transferencia, como se muestra en la figura 4.7.

Se importaron los datos de entrada y salida del sistema en el dominio del tiempo. En este caso la entrada es la señal de activación de los focos y la salida es la temperatura del contenedor con arena.

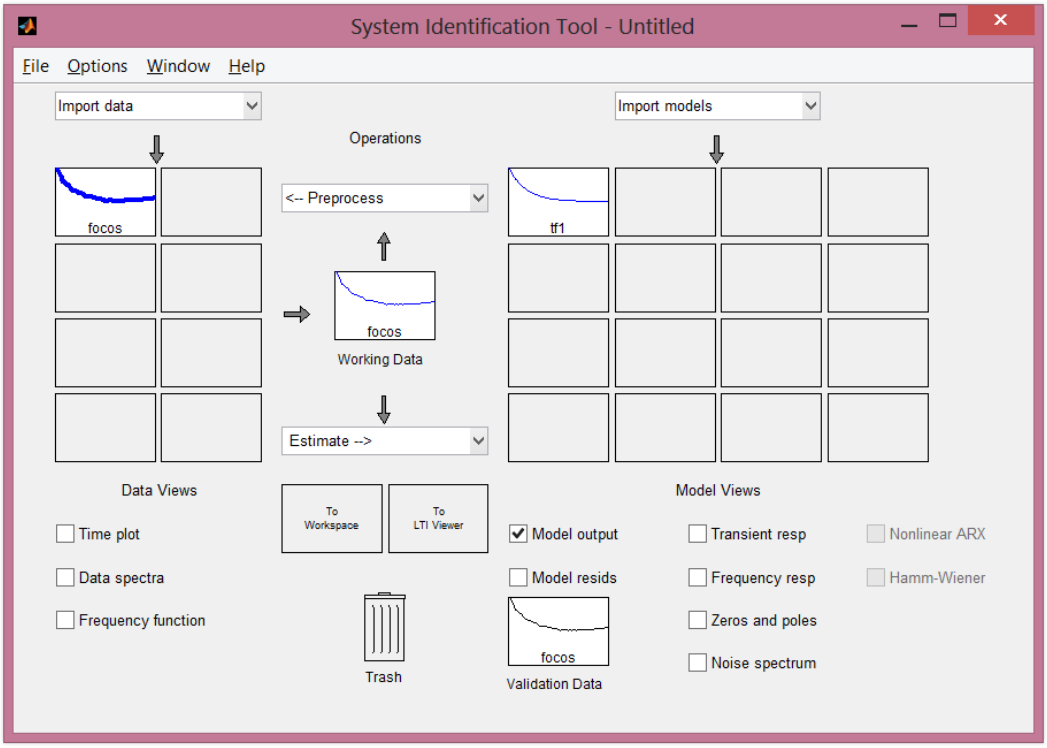


Figura 4.7 Identificación del sistema de la incubadora utilizando la librería System Identification Tool de MATLAB para arena de tipo playa.

Después se estima la función de transferencia y se parametriza con 1 polo y sin ceros de tal forma que nuestra función de transferencia sea de primer orden. La función de transferencia estimada es la siguiente:

$$G(s) = \frac{0.2069}{s + 0.005263} \quad (4.7)$$

Una vez calculada la función de transferencia se puede observar el modelo de salida simulado y conocer el grado de coincidencia con el modelo medido. La herramienta Systems Identification realiza una comparación de ambos modelos y da un porcentaje de coincidencia.

Este modelo estimado coincide un 84.62% con el modelo medido. En la figura 4.8 se observan la respuesta a una entrada de tipo escalón del modelo medido y el modelo estimado.

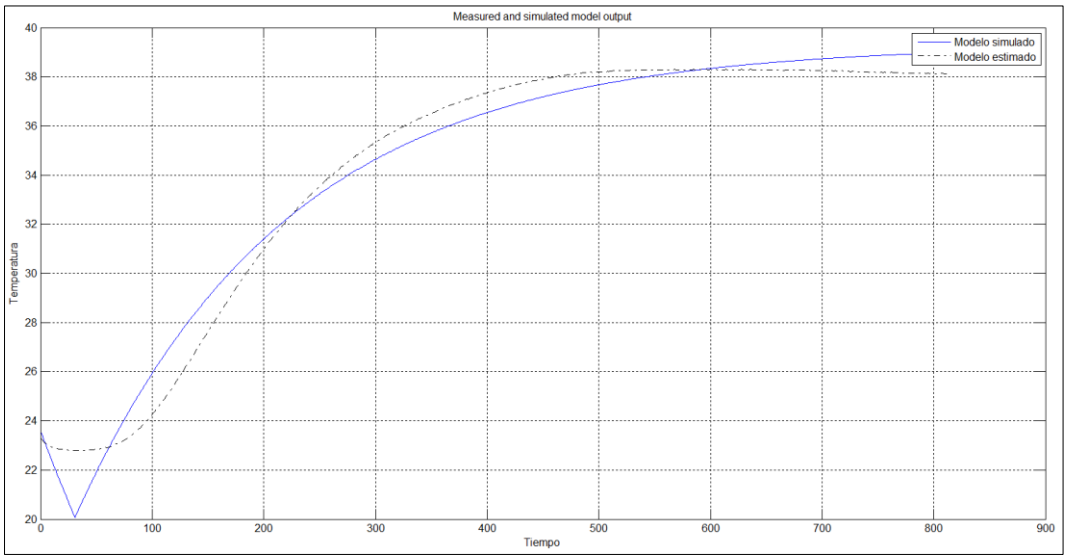


Figura 4.8 Gráfica del modelo estimado y modelo simulado de arena tipo playa.

Debido a que el funcionamiento de nuestro sistema depende en gran medida de la clase de sustrato que se vaya a utilizar para la incubación se decidió estudiar otro caso, esta vez se utilizó una arena de tipo zeolita llamada Clinoptilolita [55], como la mostrada en la figura 4.9.

Esta clase de arena es menos oscura, con diferente tamaño y porosidad que la arena de playa de Oaxaca lo que sugiere que el sistema se comportará de manera diferente.



Figura 4.9 Arena Clinoptilolita.

Se realizó nuevamente el mismo procedimiento experimental para obtener la función de transferencia que se hizo con la arena de playa de Oaxaca.

Los datos obtenidos durante la caracterización del sistema son los observados en la figura 4.10.

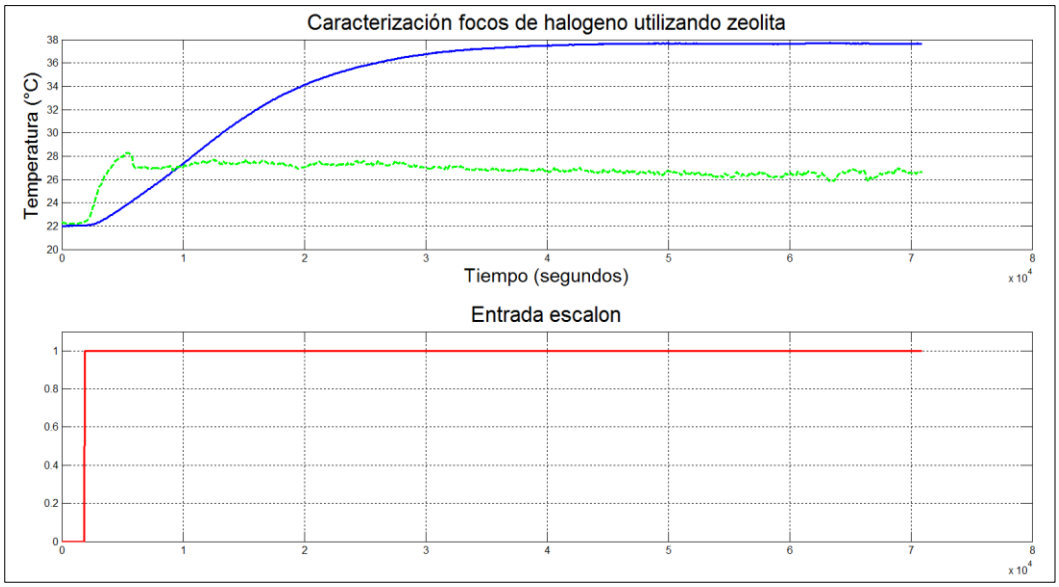


Figura 4.10 Gráfica de la respuesta del sistema de la incubadora a una entrada de tipo escalón para arena tipo zeolita.

En la gráfica anterior se observa que la temperatura ambiental, de color verde discontinua, esta mantuvo variaciones de los 22 hasta un poco más de los 28 grados centígrados, mientras que la temperatura de la arena tipo zeolita, de color azul continua, fue aumentando gradualmente hasta llegador por debajo de los 38 grados centígrados.

Como se puede observar, la respuesta del sistema a la entrada escalón utilizando arena de tipo zeolita es similar a la respuesta que tuvo a la entrada escalón utilizando arena de tipo playa.

Nuevamente utilizamos la herramienta Systems Identification de MATLAB para obtener la función de transferencia del sistema, como en la figura 4.11.

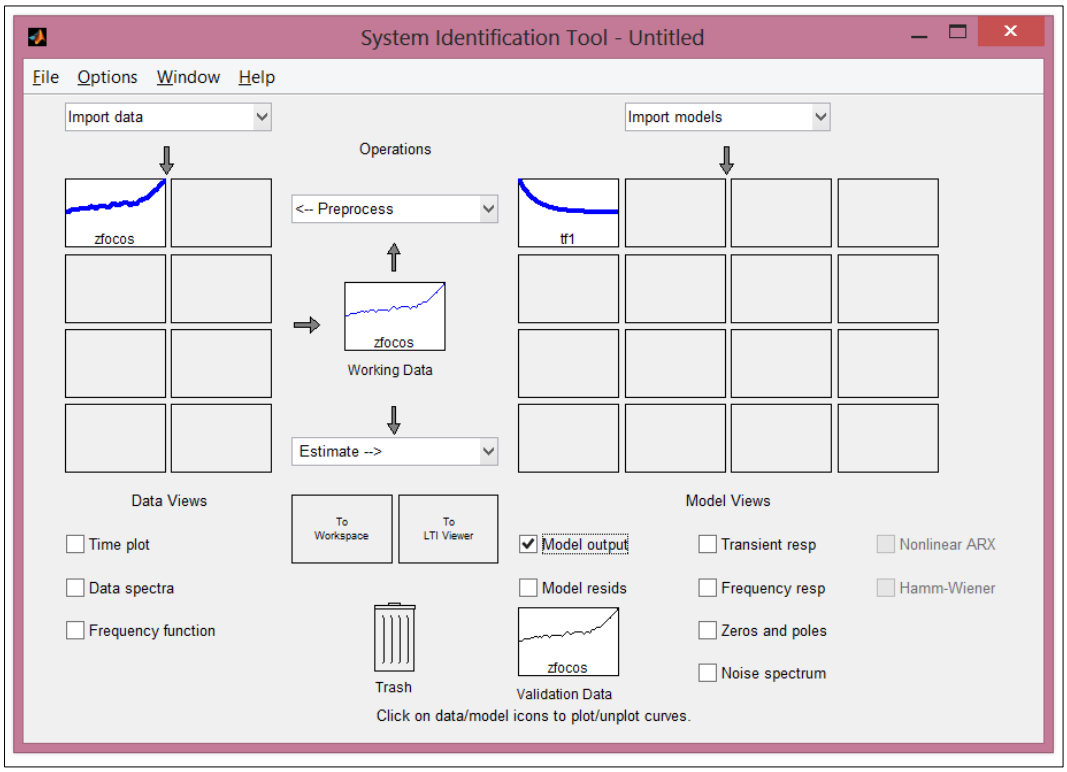


Figura 4.11 Identificación del sistema de la incubadora utilizando la librería System Identification Tool de MATLAB para arena de tipo zeolita.

Como en el caso anterior, se importaron los datos de entrada y salida del sistema en el dominio del tiempo. Con la entrada como la señal de activación de los focos y la salida como la temperatura del contenedor con zeolita.

Después se estima la función de transferencia y se parametriza con 1 polo y sin ceros de tal forma que nuestra función de transferencia sea de primer orden. La función de transferencia estimada es la siguiente:

$$G(s) = \frac{0.1792}{s + 0.004696} \quad (4.8)$$

MATLAB realiza una comparación de ambos modelos y da un porcentaje de coincidencia. Este modelo estimado coincide un 88.98% con el modelo medido. En la figura 4.12 se observa la respuesta a una entrada de tipo escalón de los dos modelos.

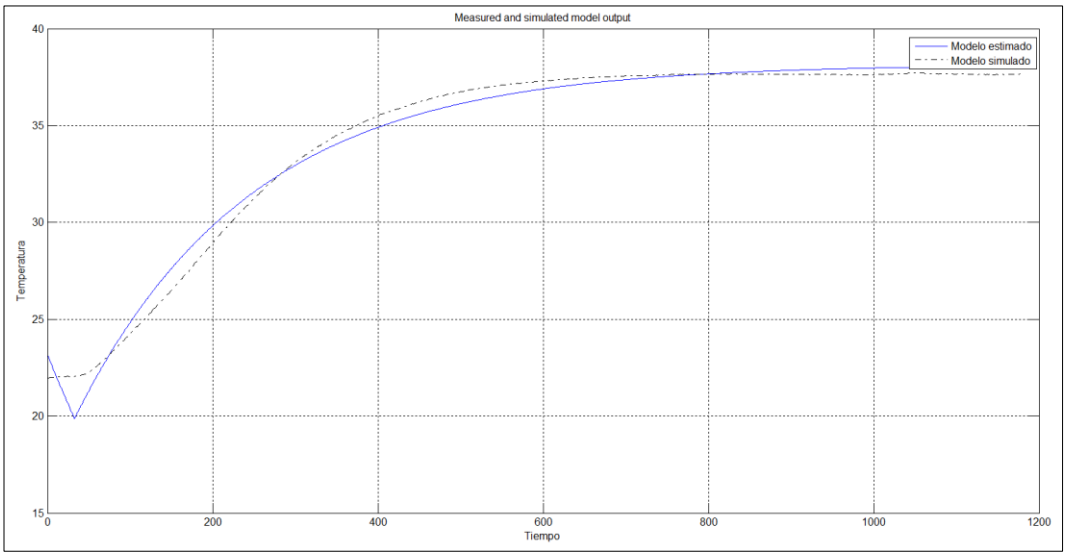


Figura 4.12 Gráfica del modelo medido y modelo simulado de arena tipo zeolita.

La nueva función de transferencia del sistema tiene una muy buena coincidencia con nuestro sistema real.

A pesar de que la función de transferencia obtenida con la arena es diferente que la obtenida con la zeolita, su comportamiento es muy similar y sus valores se encuentran dentro del mismo orden, lo que significa que si bien es importante la clase de arena con que se ponga el sistema a funcionar, no se presentará un comportamiento inadecuado o impredecible.

4.1.3 Implementación y sintonización del control

En la sección anterior se caracterizó al sistema utilizando dos clases de arena y se obtuvieron dos funciones de transferencia muy similares entre ellas. Las gráficas del sistema en respuesta a los elementos calefactores evidencian que a pesar de que el sistema no tiene exactamente la misma respuesta, su comportamiento es muy parecido con diferentes sustratos.

El control PID implementado en el sistema se trata de uno desarrollado por Brett Beauregard [56]. Este control forma parte de las librerías de Arduino y puede ser descargado directamente de la página oficial de Arduino [57].

El uso de esta librería resulta muy sencillo puesto que únicamente se tienen que especificar las ganancias Kp, Kd y Ki, definir el tiempo de muestreo y el valor de referencia.

La parte delicada es encontrar los parámetros del control PID de tal forma que funcione dentro de los requerimientos del sistema, a esta tarea se le denomina sintonización. Durante la realización de esta tarea, se buscó sintonizar el controlador PID de diferentes maneras y que el sistema tuviera la mejor respuesta posible.

En las primeras pruebas se calcularon y usaron las ganancias obtenidas con Simulink de MATLAB, en las segundas pruebas se sintonizaron las ganancias implementando el método de Ziegler-Nichols del dominio en el tiempo y por último se sintonizaron las ganancias de forma manual.

A continuación se describirán cada uno de estos ajustes de las ganancias del PID.

4.1.4 Ajuste de ganancias utilizando Simulink de MATLAB

Para este ajuste de ganancias se utilizó la biblioteca Simulink de MATLAB. Se utilizó la segunda función de transferencia obtenida de la caracterización con arena de tipo playa.

La sintonización de los parámetros de control del sistema propuesto toma en cuenta ciertas condiciones en el sistema que de otro modo afectarían la respuesta del controlador. Estás son:

- Tipo de arena: arena de playa
- Especie de los huevos: golfina
- Número de huevos: 100 (120 máximo)

Se realizaron diferentes simulaciones de controles PI, PD y PID para conocer cuál presentaba un mejor desempeño de control para la temperatura del sistema de la incubadora.

Para esta tarea se utilizó el bloque de Simulink llamado PID controller, se trata de una herramienta que permite sintonizar manualmente el controlador o bien sintonizar las ganancias del PID automáticamente utilizando el botón Tune.

En la figura 4.13 se muestran los diferentes diagramas a bloques de los diferentes tipos de controladores PID realizados en Simulink.

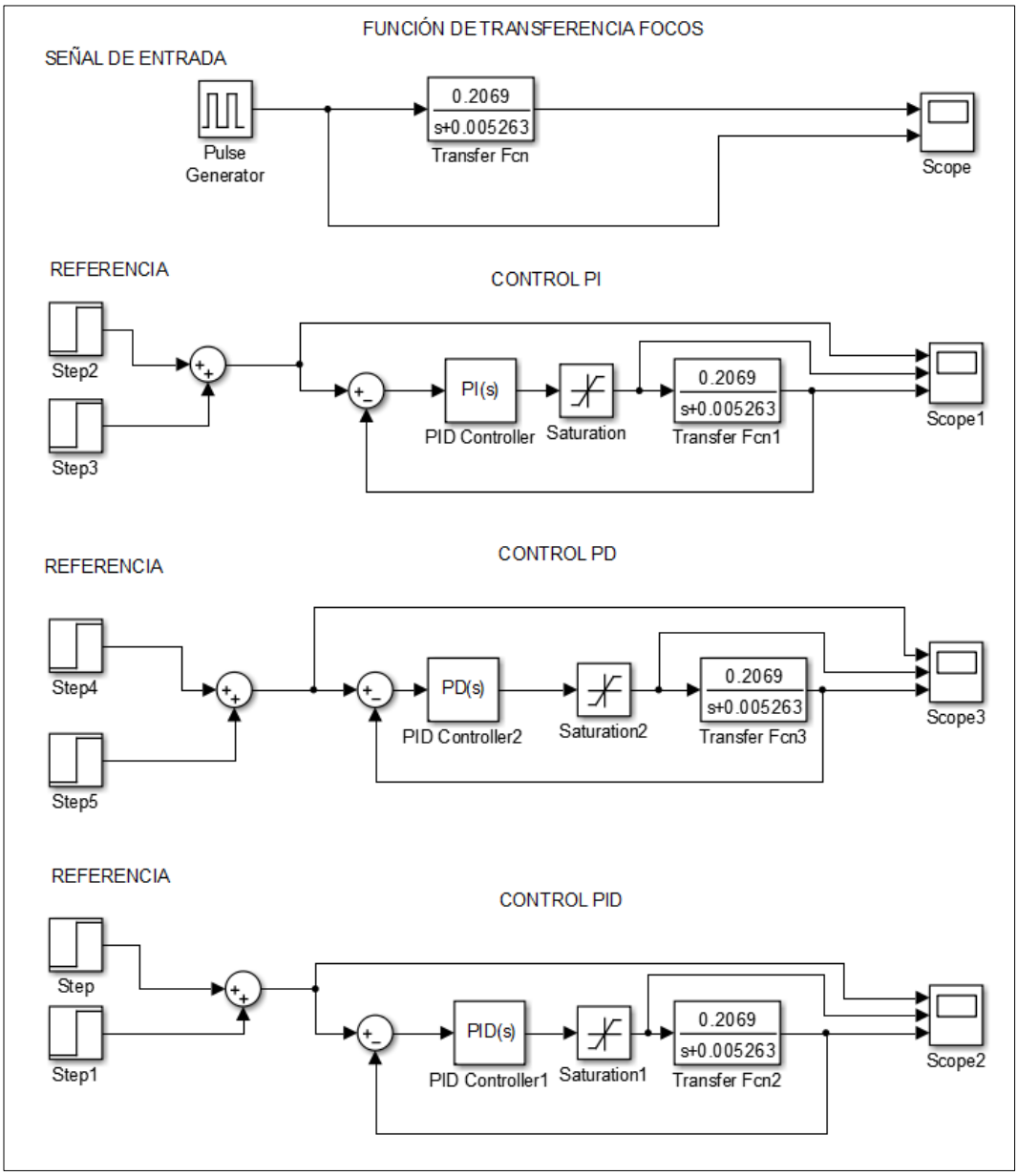


Figura 4.13 Diagrama a bloques en Simulink de MATLAB para arena tipo playa.

Ya que la señal de entrada del sistema no inicia en la temperatura deseada se colocaron dos señales de referencia de tipo escalón unitario (step), la finalidad de esto es observar cómo el sistema se establece primero en la temperatura ambiental y posteriormente observar cómo actúa la señal de control para poder llevar a la temperatura de incubación que se desea. Los resultados fueron los siguientes.

El primer caso que es analizado es para el control de tipo Proporcional-Integral. En la figura 4.14 se observa la ventana de los parámetros del controlador PID.

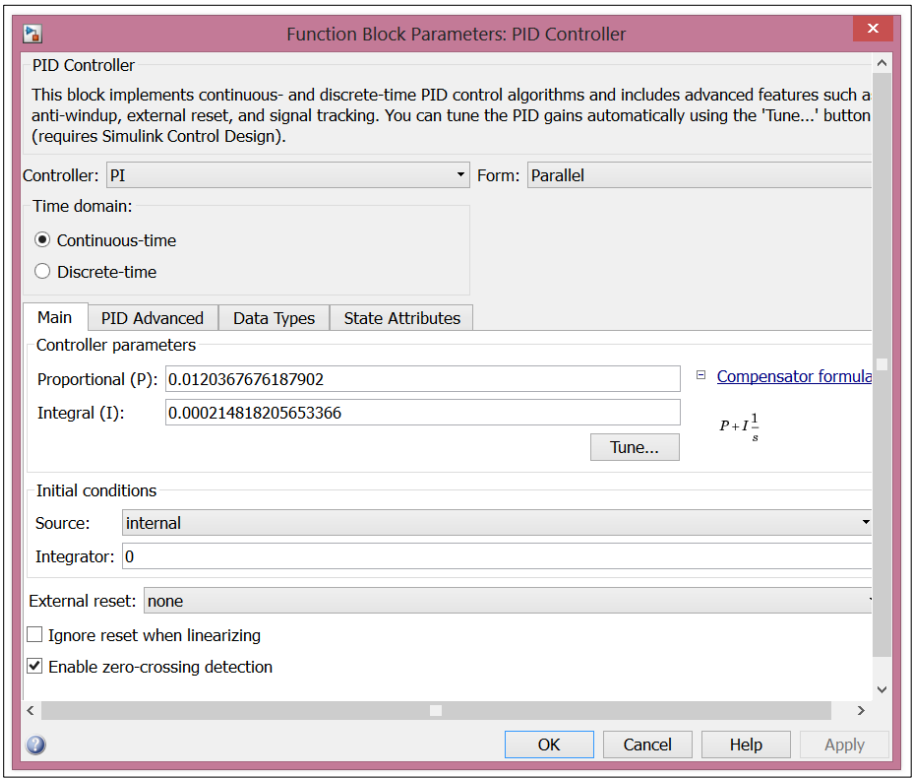


Figura 4.14 Parámetros del control PI asignados por Simulink para los focos.

Los valores de las ganancias proporcional e integral son asignados por Simulink al seleccionar la opción de sintonizar (Tune).

Utilizando un visualizador gráfico (scope) de la figura 4.15 se observan tres gráficas. La primera gráfica es la referencia del sistema donde la primera señal escalón lleva al sistema a los 26°C que suponemos es la temperatura ambiental; después incrementa 6°C para que la referencia sean 32°C, la temperatura deseada en la incubadora de las tortugas hembra. La segunda gráfica es la salida del control PI, esta señal representa el porcentaje de la señal sinusoidal que debe pasar para activar los focos. La tercera gráfica es la respuesta del sistema al control PI.

En la respuesta del sistema podemos observar que el sobrepaso del sistema es de menos de 1°C lo que lo hace una excelente opción de control.

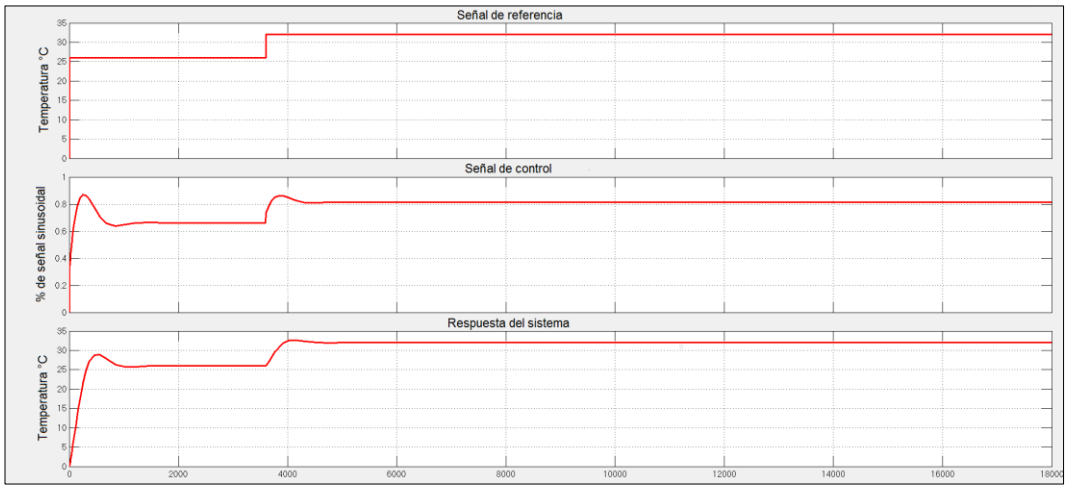


Figura 4.15 Visualizador gráfico del control PI asignado por Simulink para los focos.

El siguiente caso es un control PD. Simulink asigna los valores de las ganancias proporcional y derivativa con su opción de sintonizar, como en la figura 4.16. Además de que un valor es agregado para un filtro.

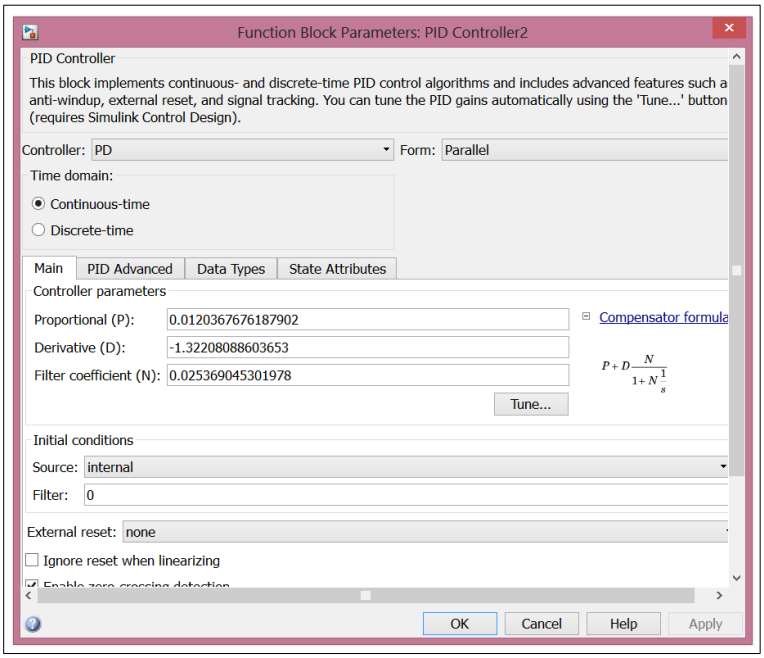


Figura 4.16 Parámetros del control PD asignados por Simulink para los focos.

Nuevamente en la figura 4.17, la primera gráfica que aparece en el visualizador gráfico es la referencia del sistema. La segunda es la salida del control PD, el porcentaje de la señal sinusoidal que debe pasar para activar los focos. En este caso, podemos observar

que el control PD no es adecuado ya que la temperatura nunca alcanza la temperatura de referencia.

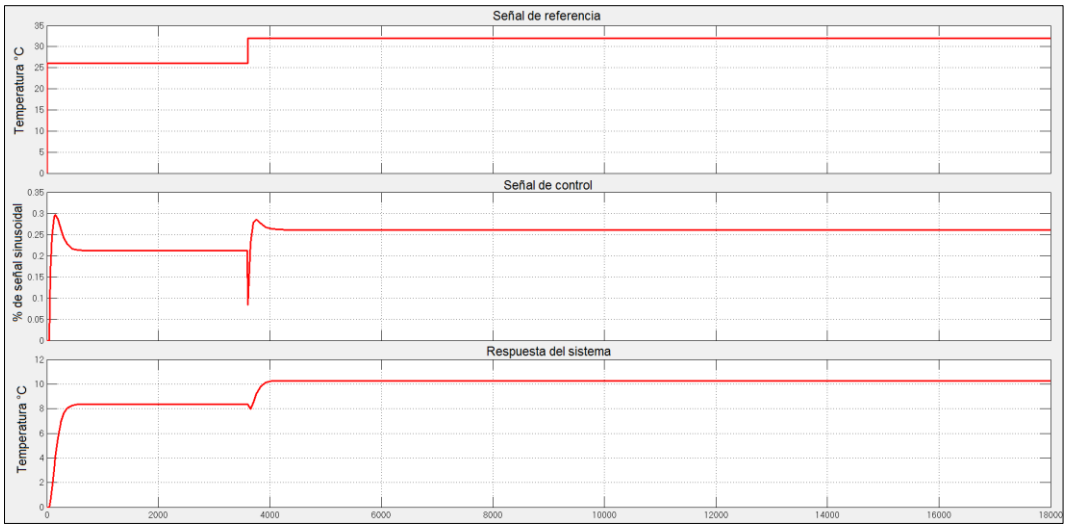


Figura 4.17 Visualizador gráfico del control PD asignado por Simulink para los focos.

Finalmente está el caso proporcional-integral-derivativo. Simulink asigna los valores para las ganancias y además un coeficiente de filtro. En la figura 4.18 se observan los parámetros sintonizados por Simulink.

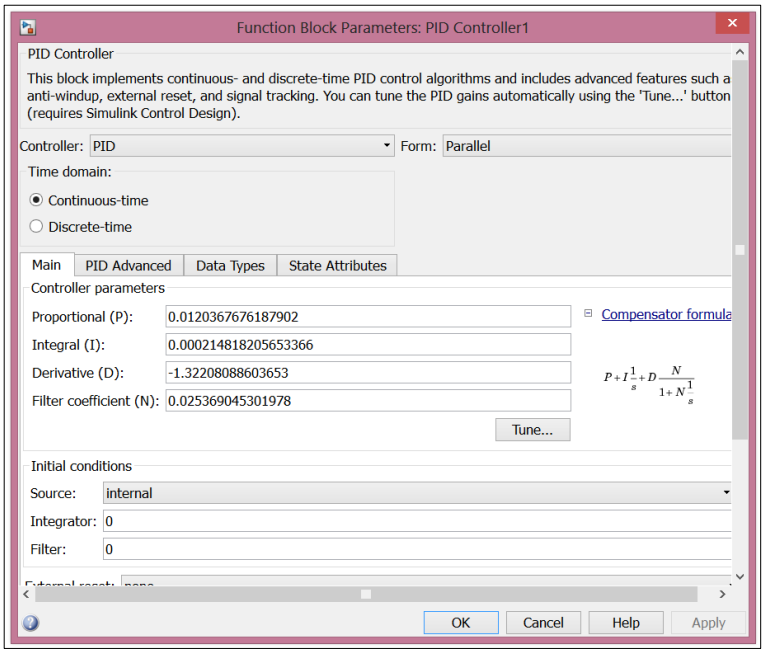


Figura 4.18 Parámetros del control PID asignados por Simulink para los focos.

En la figura 4.19 se observa el visualizador gráfico con las 3 gráficas del sistema; la primera representa la referencia, la segunda la señal de control y la tercera la salida del sistema. En este caso, se observa como la señal de control tiene un comportamiento más brusco al presentar cambios abruptos en la señal de control, lo que representa un comportamiento desfavorable. Por tal motivo se decidió realizar un control PI para los focos.

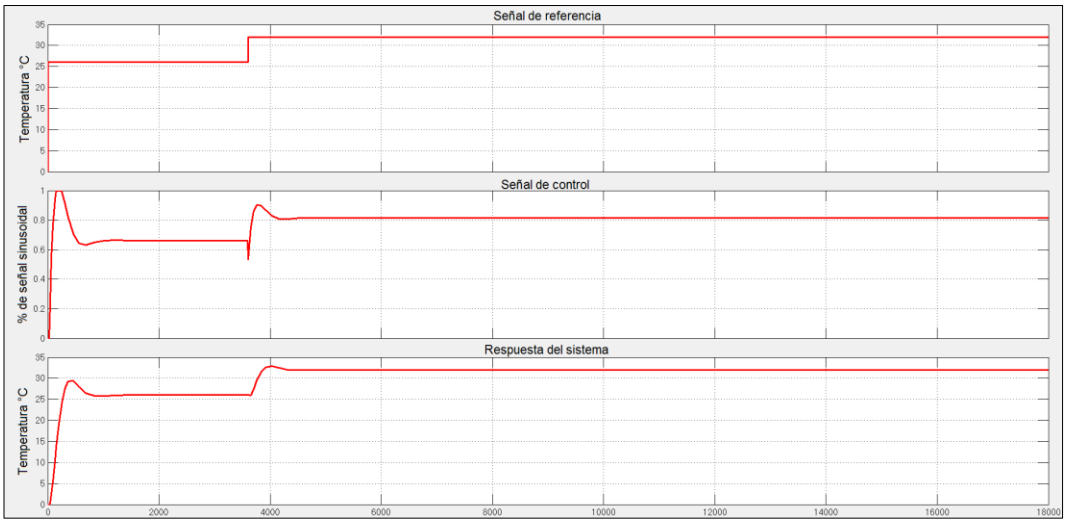


Figura 4.19 Visualizador gráfico del control PID asignado por Simulink para los focos.

Cuando la temperatura del nido está por encima de la temperatura deseada se activa el sistema de refrigeración. Una vez que la temperatura baja a la deseada o más aún, el sistema de refrigeración se apaga. Es decir que el control para enfriar al sistema es de tipo encendido-apagado

La tarjeta de control Arduino UNO fue programada con el control PI para los focos y un control On-Off para el sistema de refrigeración.

4.1.5 Ajuste de ganancias utilizando el método de Ziegler-Nichols

En 1940, Ziegler y Nichols desarrollaron dos métodos de sintonización basados en una caracterización simpe de la dinámica del proceso en los dominios del tiempo y la frecuencia.

El método del dominio en el tiempo está basado en las mediciones de parte de la respuesta del proceso a una entrada escalón, como se muestra en la figura 4.20.

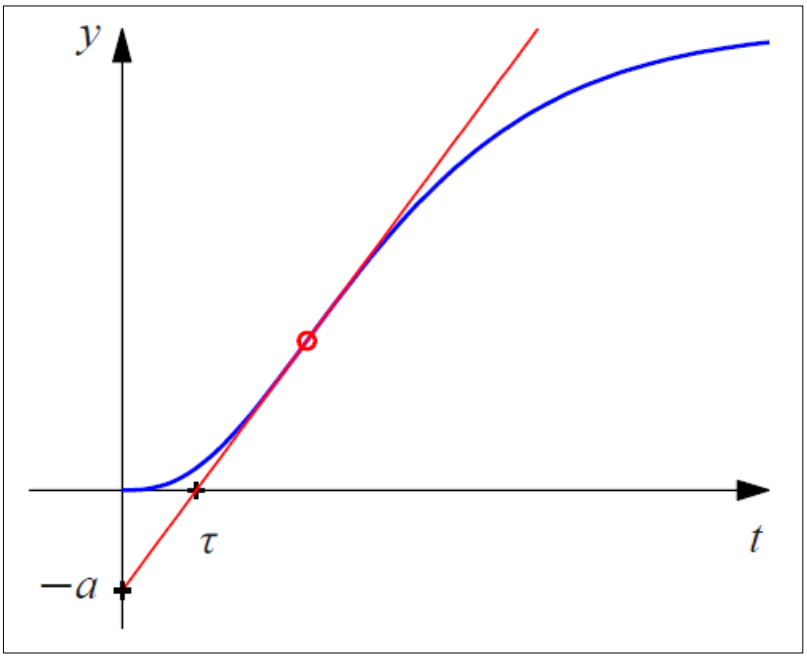


Figura 4.20 Respuesta experimental a entrada escalón de Ziegler-Nichols. La respuesta al escalón unitario esta representada por los parámetros de a y τ.

La respuesta al escalón es medida aplicándole una entrada escalón unitario al proceso y registrando la respuesta. La respuesta está caracterizada por los parámetros a y τ, los cuales son las intersecciones de la tangente más pronunciada de la respuesta al escalón con los ejes coordenados. El parámetro τ es una aproximación del tiempo de retardo del sistema y a/τ es la pendiente más pronunciada de la respuesta al escalón.

Nótese que no es necesario esperar a que se alcance el estado estacionario para encontrar los parámetros, es suficiente con esperar a que la respuesta haya tenido un punto de inflexión [58].

Los parámetros del controlador Kp, Ti, y Td se obtienen a partir de a y τ, como lo muestra la tabla 4.1.

Tipo	**Kp**	**Ti**	**Td**
P	1/a		
PI	0.9/a	3τ	
PID	1.2/a	2τ	0.5τ

Tabla 4.1 Método de Ziegler-Nichols de respuesta al escalón.

Estas reglas son usadas como punto de partida previo a la sintonización manual. No representan los valores óptimos para las ganancias del controlador.

En la figura 4.21 se observa la respuesta del sistema a la entrada escalón junto con dos líneas; la roja representa la tangente más pronunciada y la morada es la aproximación al tiempo de retardo.

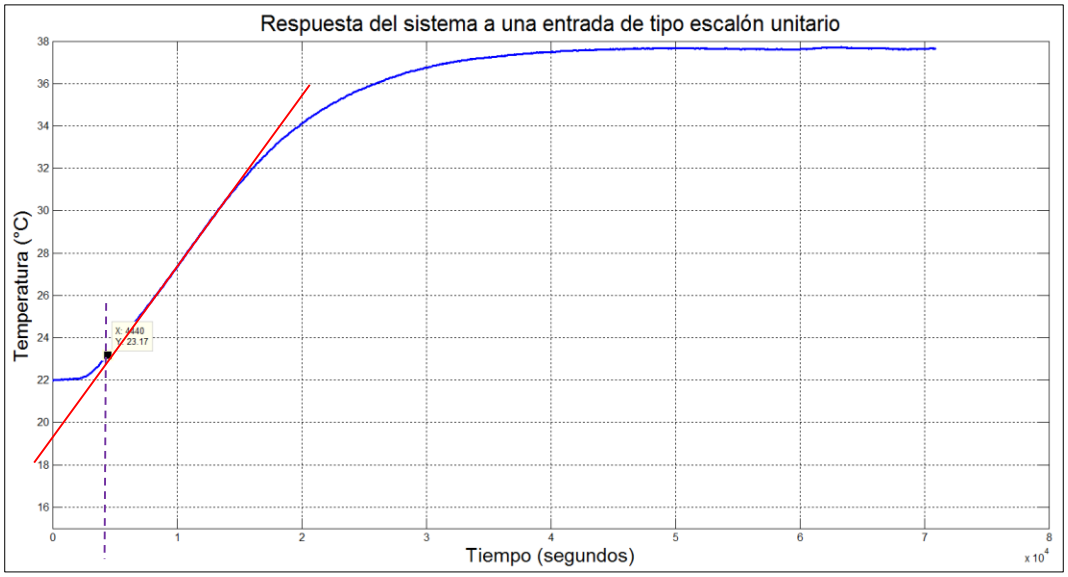


Figura 4.21 Respuesta del sistema estimado a una entrada escalón unitario para la obtención de los parámetro a y τ.

Haciendo a a=3 y a τ=4440 los valores de las ganancias quedan como en la tabla 4.2.

Tipo	**Kp**	**Ti**	**Td**
P	0.333		
PI	0.3	13320	
PID	0.4	8880	2220

Tabla 4.2 Ganancias de sintonización calculadas mediante Ziegler-Nichols.

Una vez calculadas las ganancias, podemos simular los diferentes controles con Simulink y observar las diferentes respuestas del sistema. En la figura 4.22 se encuentran los diagramas a bloques de control realizados en Simulink.

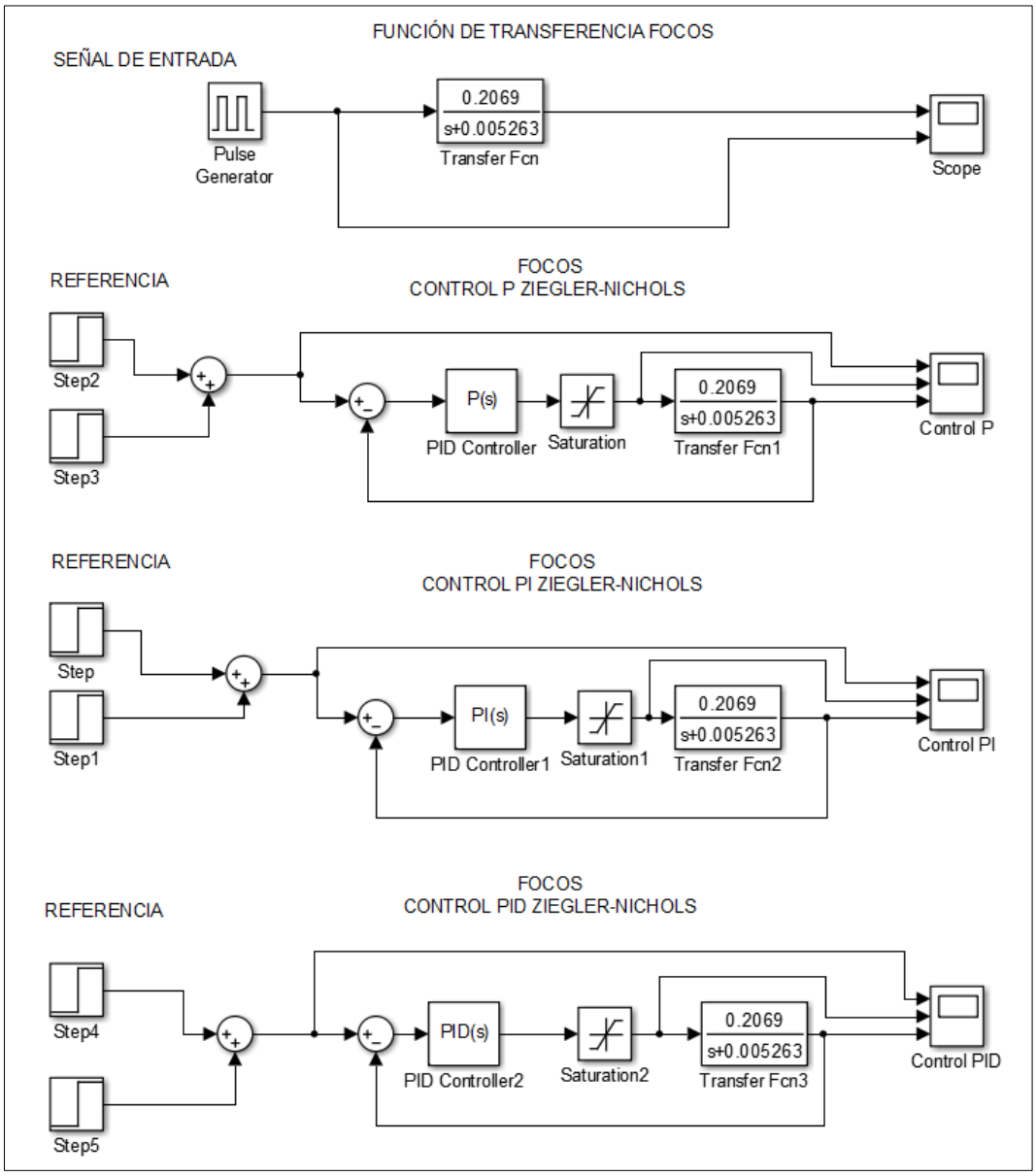


Figura 4.22 Diagramas a bloques del PID calculado con Ziegler-Nichols en Simulink.

En la figura 4.23 se presentan los resultados observados en el visualizador gráfico del control P calculado con Ziegler-Nichols. La primera gráfica corresponde a la referencia, la segunda es la señal de control y la tercera es la respuesta del sistema. Como se puede observar en la respuesta, existe un offset de 2 unidades.

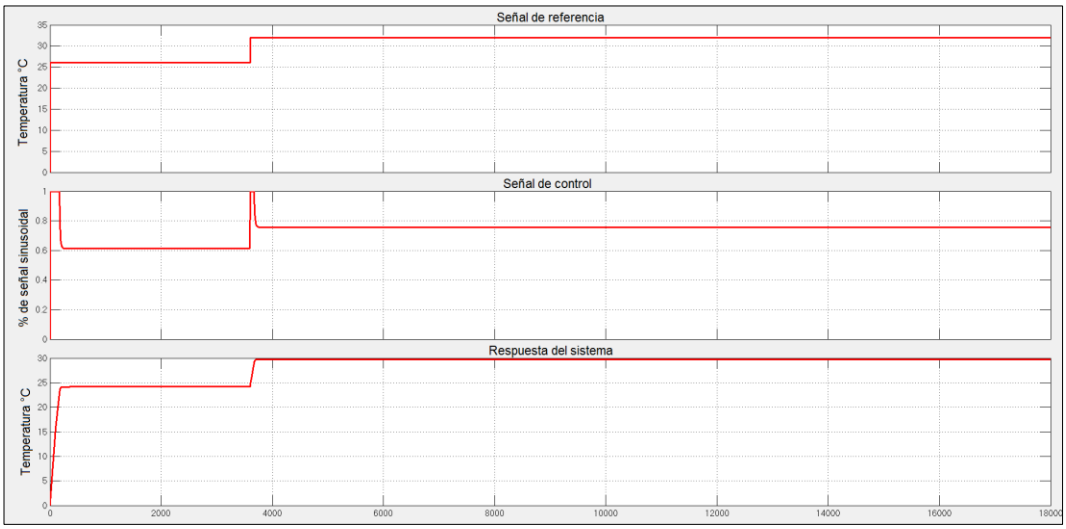


Figura 4.23 Visualizador gráfico del control P estimado con Ziegler-Nichols.

En la figura 4.24 se observan los resultados del control PI con Ziegler-Nichols. De manera similar a la anterior, la primera gráfica corresponde a la referencia, la segunda a la señal de control y la tercera a la respuesta del sistema. Se puede observar que la respuesta del sistema es muy lenta, una vez alcanzados los 30°C tiende a aumentar pero en la simulación no alcanza a llegar a la referencia.

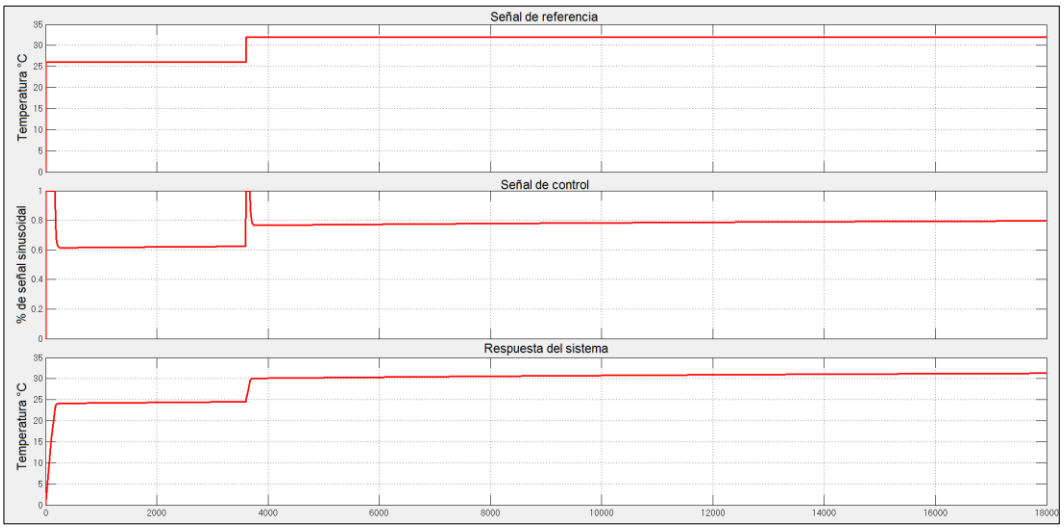


Figura 4.24 Visualizador gráfico del control PI estimado con Ziegler-Nichols.

En la figura 4.25 tenemos los resultados del control PID calculados con Ziegler-Nichols. Se puede observar como la señal de control presenta oscilaciones muy pequeñas. La respuesta del sistema es más rápida que las anteriores, presenta pequeñas oscilaciones en ciertos lapsos de tiempo, logra llegar a la referencia.

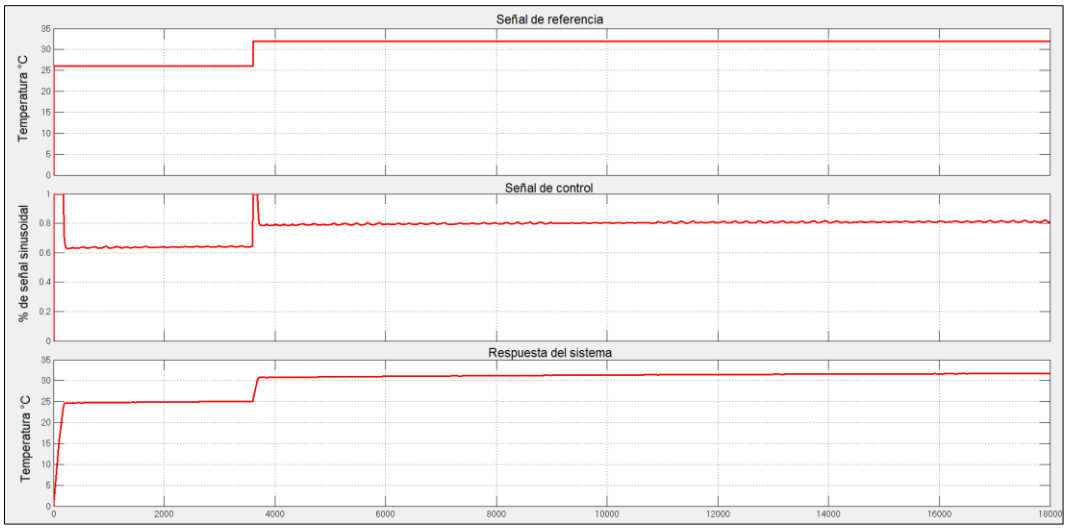


Figura 4.25 Visualizador gráfico del control PID estimado con Ziegler Nichols.

Si bien hay que recordar que el método de Ziegler-Nichols sirve como punto referencia para la sintonización de las ganancias, las simulaciones utilizando las ganancias calculadas mostraron que la respuesta del sistema logra llegar a la referencia y se mantiene estable lo que podemos considerar como buenos resultados.

4.1.6 Ajuste de ganancias manual

El ajuste de ganancias manual se realizó tomando como base las ganancias calculadas con Ziegler-Nichols. Después de una serie de sintonizaciones, se eligieron las ganancias de Kp=0.5 y Ki=0.0002. En la figura 4.26 podemos observar el visualizador gráfico con los resultados obtenidos para estos valores de sintonización con Simulink.

La primera gráfica corresponde a la señal de control. La señal de control que corresponde a la segunda gráfica del visualizador presenta muy pequeñas oscilaciones, a pesar de eso se aprecia como la respuesta del sistema logra alcanzar y mantener la referencia; por lo que podemos considerar estas ganancias como admisibles para el sistema.

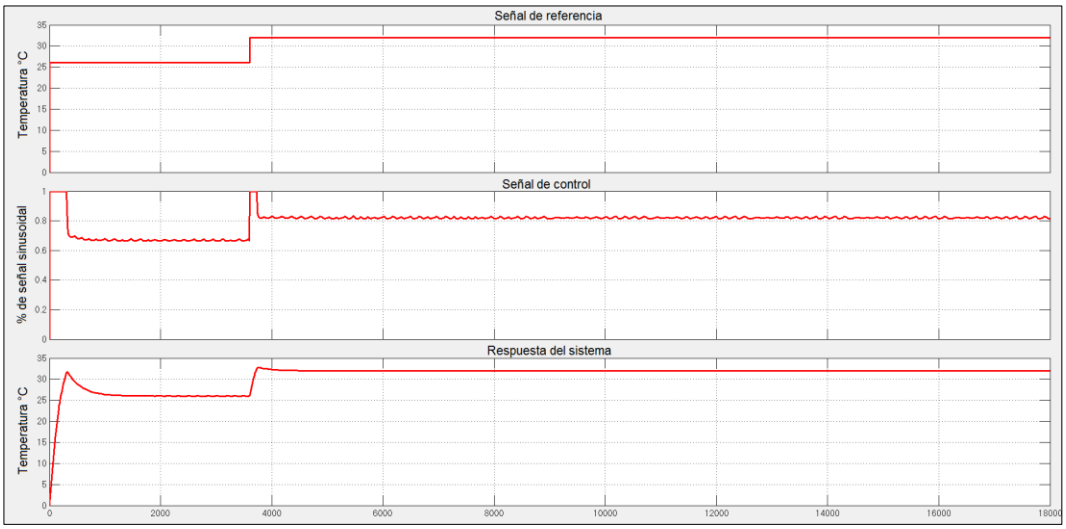


Figura 4.26 Visualizador gráfico del control PI con ganancias sintonizadas manualmente.

4.2 Control de humedad

El control de humedad es de lazo abierto como se muestra en la figura 4.27.

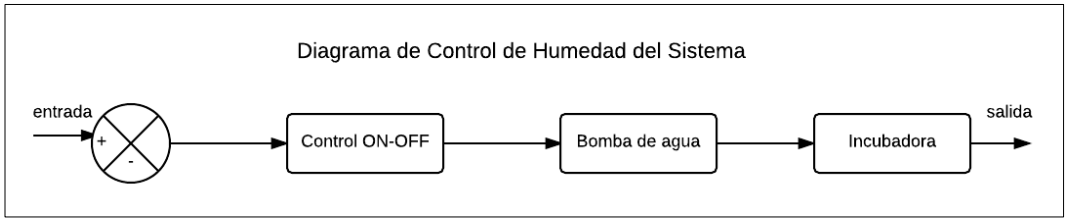


Figura 4.27 Diagrama a bloques de control de humedad del sistema en lazo abierto.

Contrario al control de temperatura, el control de humedad es de lazo abierto debido a que no se cuenta con un sensor de humedad que arroje valores precisos de la humedad en la arena, por lo que resultaría incongruente diseñar un control en lazo cerrado sabiendo que no se cuenta con un sensor. Otro punto muy importante que se investigó en el segundo capítulo es que aún no están definidos los valores de humedad precisos para un buen desarrollo de los huevos de tortugas. Los estudios no se han realizado para todas las especies de tortugas marinas e incluso los valores pueden variar con la misma especie pero diferente arena.

Asimismo algunos autores hablan de valores en término de porcentaje de contenido de agua en relación al peso del sustrato, mientras que otros recomiendan cantidades en porcentaje de humedad de saturación. El contenido de agua en sustratos es usualmente

reportado como el porciento de humedad relativa, el cual es igual a la masa de agua por unidad de masa de suelo seco al horno. Este se define como:

$$\%RH = \frac{m-d}{m}(100)$$

donde m es la masa del suelo húmedo antes del secado y d es la masa de suelo luego de secado al horno. El problema existente del sistema es que no se puede realizar las mediciones para calcular la humedad relativa puesto que este proceso comprende el pesar la arena pero además asegurarse de su secado por medio de un horno [59].

La propuesta de este control es el de suministrar cierta cantidad de agua al nido diariamente, tomando en cuenta que esta cantidad se deberá ajustar a la que los supervisores consideren correcta para el nido. El programa en Arduino activará unos segundos la bomba de agua para que el nido se mantenga húmedo, el tiempo de activación es programado por el usuario.

4.3 Interfaz de usuario

La interfaz de usuario se creó utilizando el software Workshop 4 de la compañía 4D Systems. Este software permite crear interfaces gráficas rápidas para ser programadas en diferentes pantallas de la misma compañía. En la figura 4.28 se puede observar el entorno gráfico de dicho software.

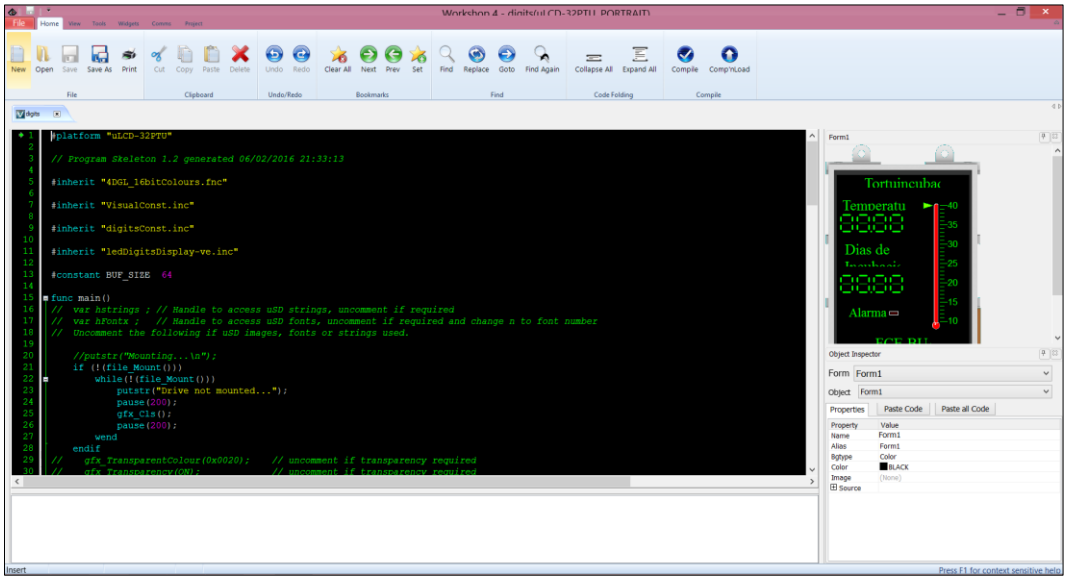


Figura 4.28 Entorno de programación del software Workshop 4 de 4D Systems.

El Arduino envía los datos de temperatura y día a la pantalla por comunicación serial. La interfaz desarrollada quedó como en la figura 4.29.



Figura 4.29 Interfaz del sistema.

El propósito de esta sencilla interfaz es de proveer al usuario del valor actual de temperatura del nido y los días de incubación al usuario. Adicionalmente se implementó una alarma que se activa cuando el valor de temperatura está fuera de los rangos permitidos. En la pantalla se puede observar un termómetro que marca la temperatura, así como también se despliegan numéricamente la temperatura y el día de incubación; la alarma consta de un LED que parpadea cuando la temperatura se encuentra en los límites del rango permitido y además, un sonido de tipo wav (Waveform Audio File Format) es emitido de bocina de la pantalla para avisar al usuario para que éste tome las medidas que crea necesarias.

4.4 Programa

Se describirá de manera general algunas de las características del programa desarrollado en Arduino. El programa fue comentado y puede ser consultado en el anexo A. Las conexiones del puerto de entradas y salidas del Arduino son como las mostradas en la tabla 4.3.

No. de pin	Conexión a
0	S/C
1	Pantalla
2	S/C
3	Ventilador 1
4	Ventilador 2
5	Extractor de aire
6	Bomba irrigadora
7	Ventilador Peltier
8	Placa Peltier
9	Bomba Peltier
10	Datos Sensor SHT10
11	Reloj Sensor SHT10
12	S/C
13	S/C
A1	S/C
A2	S/C
A3	S/C
A4	Pin 15 (PCF8574P)
A5	Pin 14 (PCF8574P)

Tabla 4.3 Conexiones de los pines de la tarjeta Arduino UNO.

El sensor de temperatura ambiental HIH-6130 y el reloj de tiempo real son conectados directamente a la placa de prototipado rápido en los módulos I²C.

Las librerías que se usaron en el programa fueron las siguientes:

- Librería para el sensor de temperatura de la arena: SHT1x.h [60]
- Librería para el sensor de temperatura ambiental: HIH6130.h [61]
- Librería para el reloj de tiempo real DS1307.h [62]
- Librería para la comunicación I²C Wire.h [63]
- Librería del control PID PID_v1.h [64]

En la figura 4.30 se presenta el diagrama de flujo de la etapa de configuración del programa en Arduino.

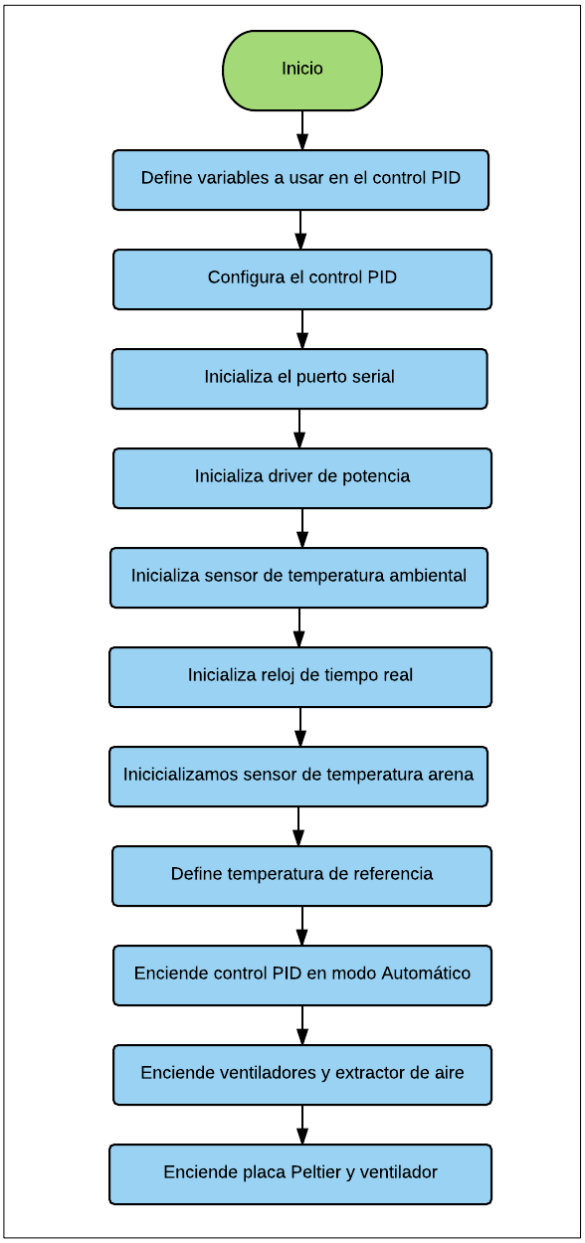


Figura 4.30 Diagrama de flujo de la configuración del programa en Arduino.

Después de la etapa de configuración en el Arduino se encuentra el algoritmo principal del programa. En la figura 4.31 se observar el diagrama de flujo del programa principal.

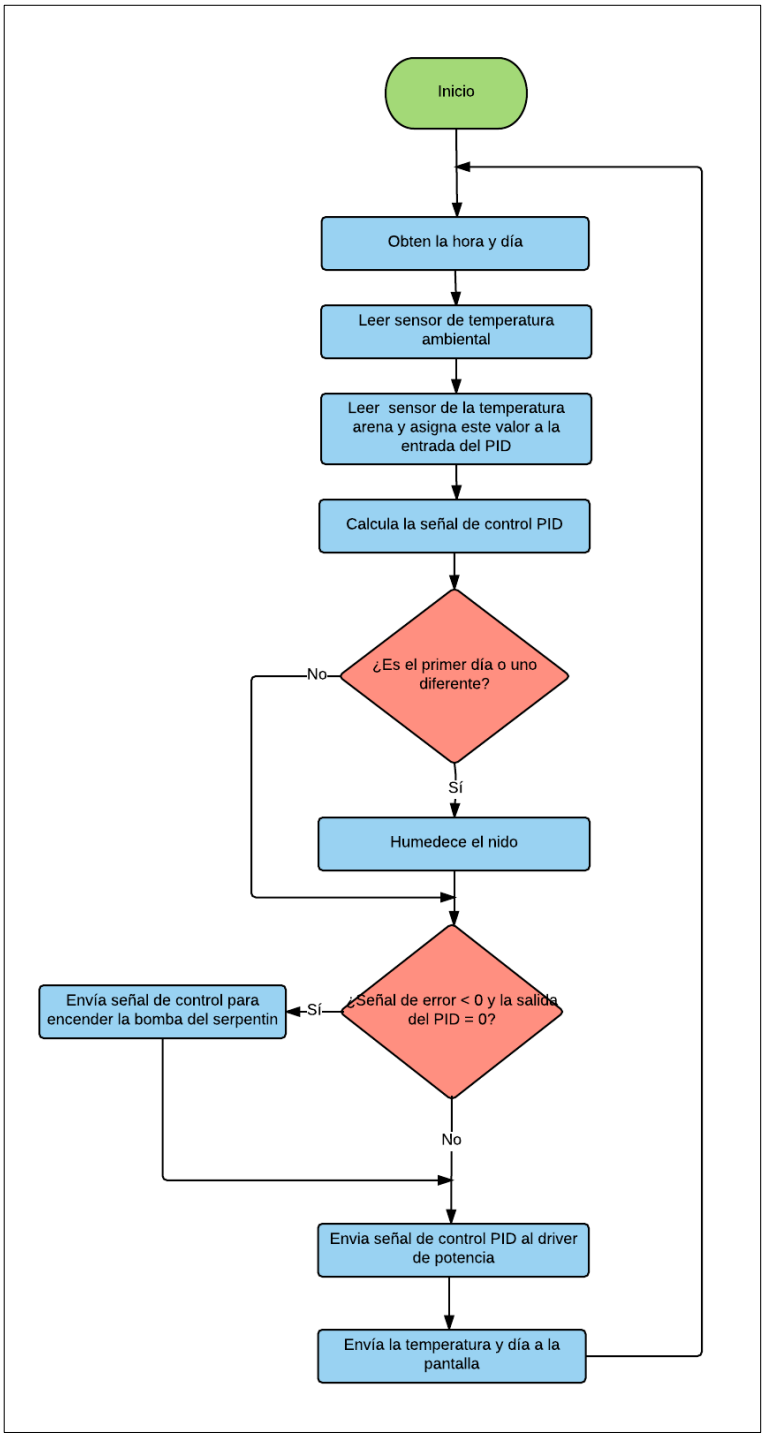


Figura 4.31 Diagrama de flujo del programa principal del Arduino.

En la figura 4.32 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo del driver de potencia.

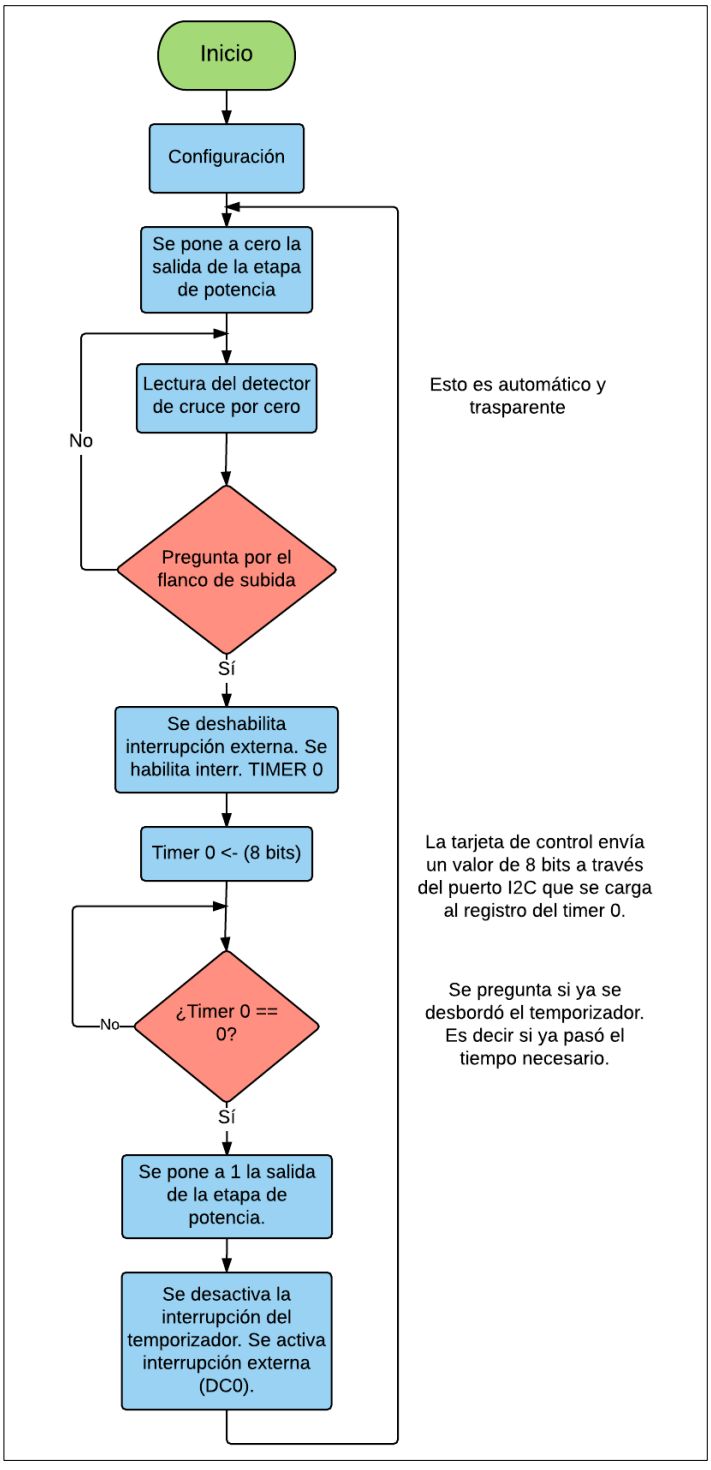


Figura 4.32 Diagrama de flujo del driver de potencia.

Capítulo 5. Resultados experimentales

En el capítulo anterior se calcularon las ganancias del control PID de acuerdo a tres diferentes métodos. En este capítulo se describirán los resultados experimentales obtenidos con las diferentes ganancias calculadas para el control PID de temperatura, los resultados del desempeño general del sistema durante las pruebas y algunos comentarios sobre el sistema acoplado con resortes.

5.1 Resultados experimentales del control

El control PID de temperatura para los focos fue probado con distintas ganancias. Las ganancias que se utilizaron para realizar las pruebas fueron las mostradas en la tabla 5.1.

Método	**Ganancia Kp**	**Ganancia Ki**	**Ganancia Kd**
Simulink	0.012	0.000214	-1.322
Simulink	0.01203	0.0002	0
Ziegler-Nichols	0.4	0.000045	888
Manual	0.5	0.0002	0

Tabla 5.1 Ganancias Kp, Ki y Kd utilizadas durante los experimentos.

Las ganancias que fueron calculadas con Simulink fueron probadas experimentalmente con la finalidad de hacer una comparativa entre la respuesta del sistema simulada y la respuesta estimada.

La temperatura de referencia de las pruebas fue programada en la tarjeta Arduino, y fueron establecidas basadas en la temperatura de incubación de las hembras a 32°C y a 28°C para machos.

Los resultados siguientes toman en cuenta una cantidad de 100 huevos de tortuga golfina. El número de huevos en el contenedor afecta directamente la cantidad de arena que se necesita en el mismo. Debido a que la cantidad de arena en el contenedor es

elemental para que el controlador funcione correctamente, sería necesario volver a sintonizar las ganancias si el número de huevos aumenta o disminuye considerablemente.

5.1.1 Resultados del control PID utilizando las ganancias calculadas por Simulink

En la tabla 5.2 se muestran las ganancias utilizadas durante la prueba del control PID.

Kp	Ki	Kd
0.012	0.0002148	-1.322

Tabla 5.2 Ganancias PID calculadas por Simulink utilizadas durante el experimento.

- Duración de la prueba: 12 horas y 58 minutos
- Temperatura de referencia: 28°C

En la figura 5.1 se muestran dos gráficas de los resultados del experimento. La gráfica en la parte superior contiene dos líneas; la línea azul continua representa la temperatura del nido y la línea verde discontinua representa la temperatura ambiental. La gráfica en la parte inferior muestra la señal de control.

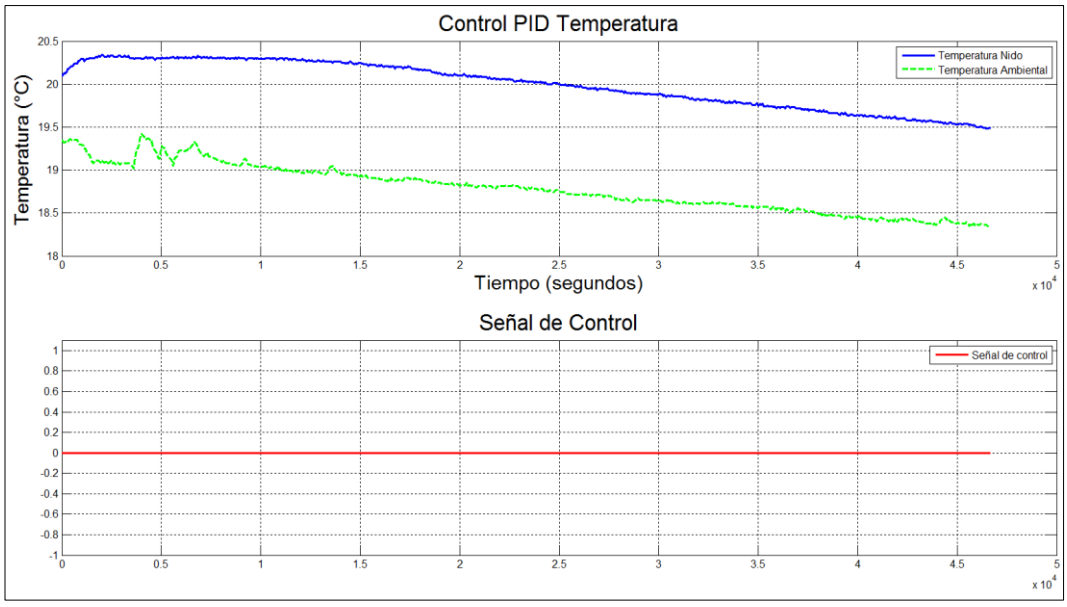


Figura 5.1 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias calculadas por Simulink.

A diferencia de los resultados simulados en Simulink, los resultados experimentales con las ganancias calculadas por Simulink fueron desfavorables debido a que nunca se

activó la señal de control. Podemos observar como la temperatura del nido es siempre aproximadamente 1°C mayor que la temperatura ambiental durante la prueba.

5.1.2 Resultados del control PI utilizando las ganancias calculadas por Simulink

En la tabla 5.2 se muestran las ganancias utilizadas durante la prueba del control PID.

Kp	Ki	Kd
0.01203	0.0002	0

Tabla 5.3 Ganancias PI calculadas por Simulink utilizadas durante el experimento.

- Duración de la prueba: 11 horas y 39 minutos
- Temperatura de referencia: 32°C

En la figura 5.2 se muestran dos gráficas de los resultados del experimento. La gráfica en la parte superior contiene dos líneas; la línea azul continua representa la temperatura del nido y la línea verde discontinua representa la temperatura ambiental. La gráfica en la parte inferior muestra la señal de control.

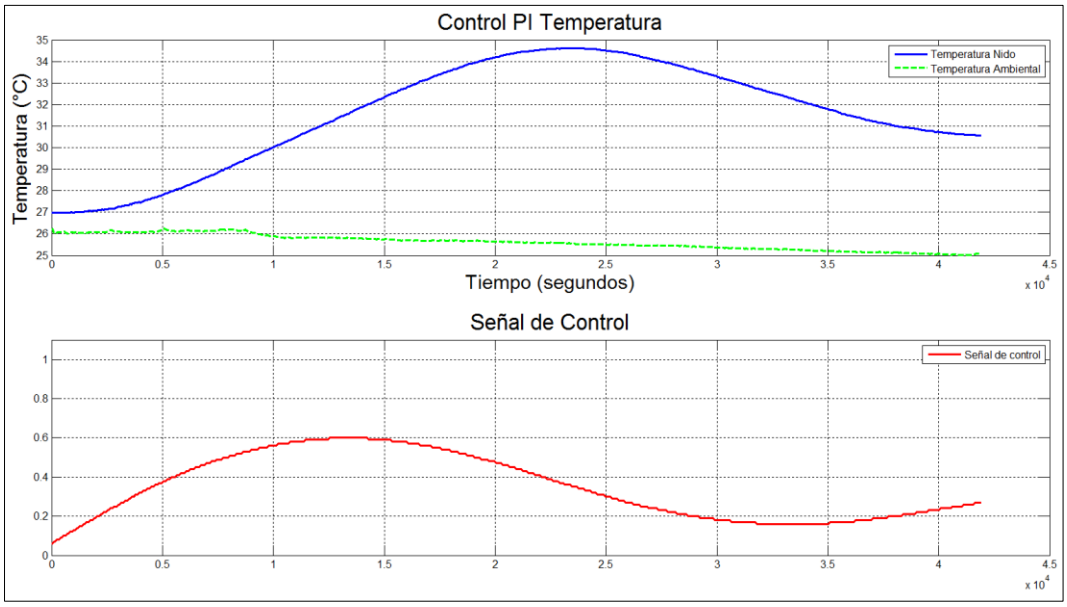


Figura 5.2 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias PI calculadas por Simulink.

Los resultados experimentales con las ganancias PI calculadas por Simulink fueron desfavorables. Podemos observar como la temperatura del nido no llega a estabilizarse, por el contrario, presenta un comportamiento oscilatorio al igual que la señal de

control. Además, el nido alcanza los 35.61°C, lo que queda fuera de nuestro rango de tolerancia establecido de ±1°C.

5.1.3 Resultados del control PID utilizando las ganancias calculadas por el método de Ziegler-Nichols

En la tabla 5.3 se muestran las ganancias utilizadas durante la prueba del control PID.

Kp	Ki	Kd
0.4	0.000045	888

Tabla 5.4 Ganancias PID calculadas con Ziegler-Nichols utilizadas durante el experimento.

- Duración de la prueba: 14 horas y 5 minutos
- Temperatura de referencia: 32°C

En la figura 5.2 se muestran dos gráficas de los resultados del experimento. La línea azul contínua es la respuesta del sistema, la verde discontinua es la temperatura ambiental.

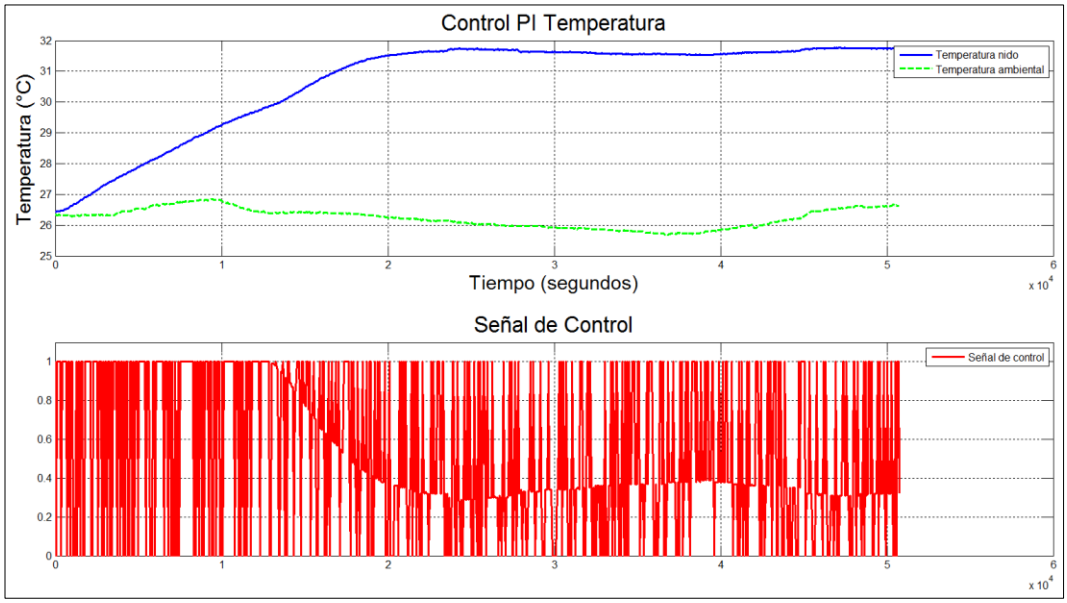


Figura 5.3 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias calculadas por Ziegler-Nichols.

El desempeño del control con las ganancias calculadas por Ziegler-Nichols resulta ser inapropiado para el sistema. La temperatura del sistema se encuentra muy cerca de la referencia, presentando un offset de 0.3°C. Si bien esta descompensación se encuentra

dentro de los objetivos establecidos; la señal de control presentó un comportamiento muy oscilatorio, que resulta poco deseable.

5.1.4 Resultados del control PI utilizando las ganancias calculadas manualmente

En la tabla 5.4 se muestran las ganancias utilizadas durante la prueba del control PI.

Kp	Ki	Kd
0.5	0.0002	0

Tabla 5.5 Ganancias PI sintonizadas manualmente.

- Duración de la prueba: 12 horas y 13 minutos
- Temperatura de referencia: 28°C
- Sobretiro máximo: 0.62°C

En la figura 5.4 se muestran dos gráficas del experimento. La gráfica en la parte superior contiene dos líneas; la línea azul continua representa la temperatura del nido y la línea verde discontinua representa la temperatura ambiental. La gráfica en la parte inferior muestra la señal de control.

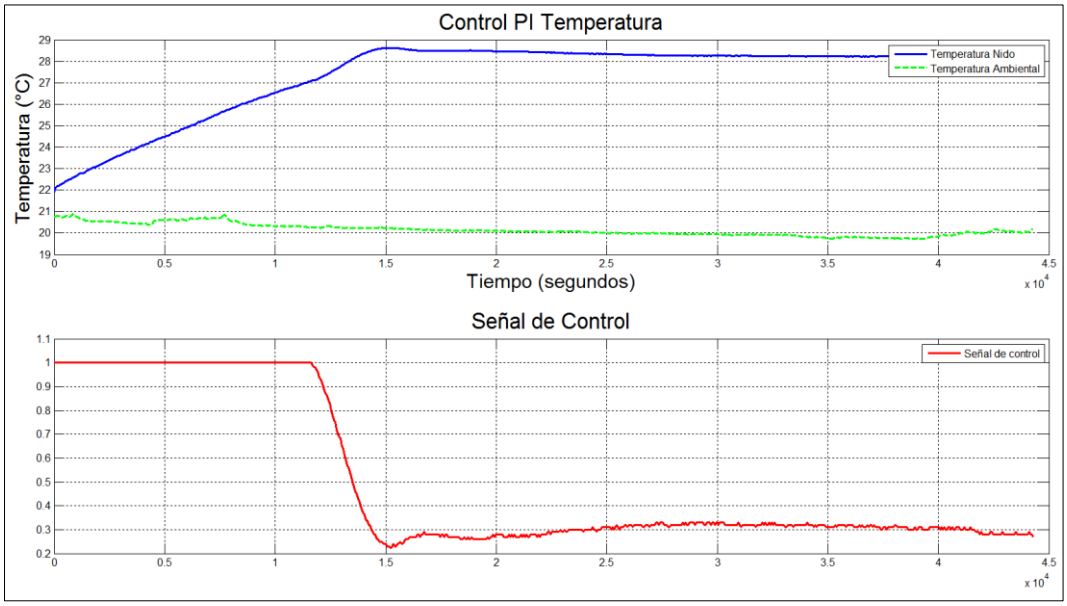


Figura 5.4 Resultados de la prueba experimental utilizando las ganancias sintonizadas manualmente.

Los resultados obtenidos durante esta prueba fueron favorables, los 28°C son alcanzados por el sistema a las 3 horas y 43 minutos, tiene un sobretiro máximo de 0.62°C; depués se mantiene con un error promedio de 0.23°C por arriba de la referencia.

Al principio, esta sintonización manual estuvo basada en las ganancias auto-sintonizadas con Simulink. Las simulaciones mostraron que el control de tipo Proporcional-Derivativo era más efectivo, por lo tanto se supuso como correcta esta premisa. Sin embargo, después del resultado desfavorable de las pruebas experimentales, se usaron las ganancias calculadas con Ziegler-Nichols como base para hacer el ajuste manual. El mejor resultado que se obtuvo fue el control PI utilizando la sintonización manual de las ganancias.

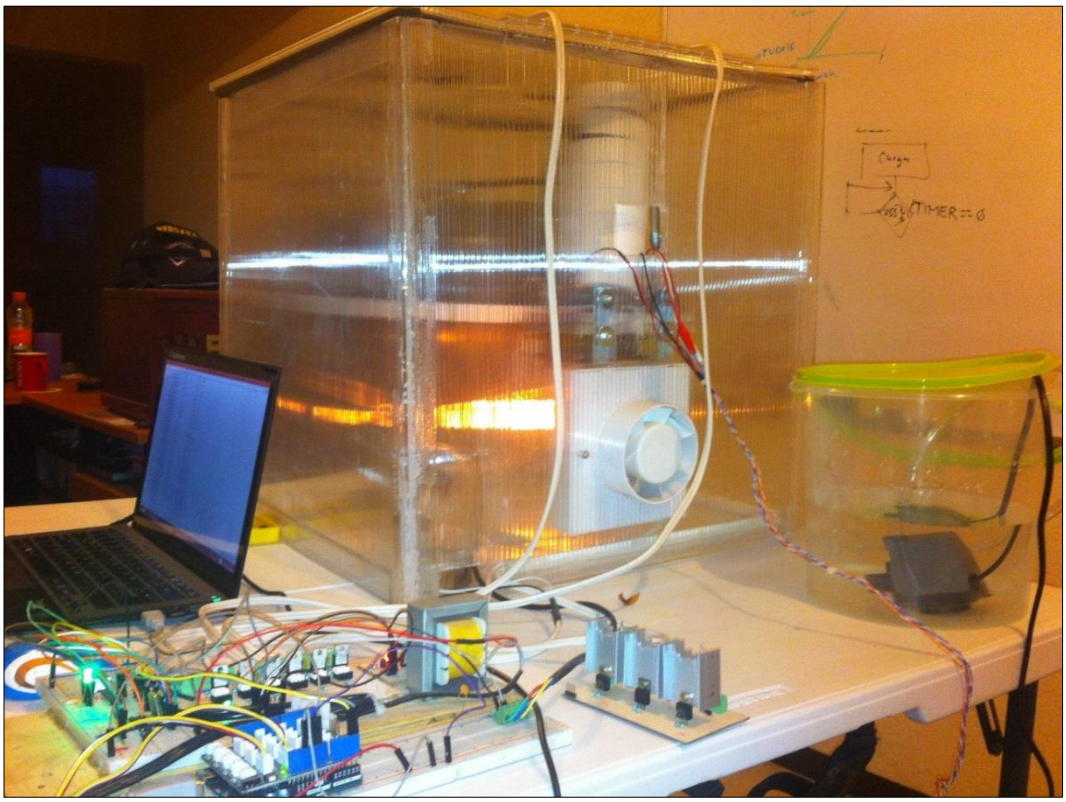


Figura 5.5 Sistema de incubación durante las pruebas.

Como se observa en todos los experimentos, la respuesta del sistema es muy lento, sin embargo esto no representa un problema. Dado que, se tiene que tomar en consideración que antes de colocar los huevos en la incubadora se necesita de una etapa de precalentamiento para que de esta manera la temperatura del nido se encuentre próxima a la deseada. Además, esta respuesta lenta resulta beneficiosa para los huevos ya que de otro modo pueden sufrir daños si se exponen a cambios bruscos de temperatura.

Después de observar las respuestas experimentales del sistema a los diferentes controladores se puede concluir que el sistema se comporta de mejor manera con un control de tipo Proporcional-Integral. La adición de la acción derivativa afecta la señal de control al introducir oscilaciones indeseadas como se demuestra en el experimento del control PID sintonizado con Ziegler-Nichols. Si bien se espera que este comportamiento oscilatorio de la señal control disminuya o desaparezca si se disminuye el valor de la ganancia derivativa, en el experimento con la sintonización manual se probó que eliminando la ganancia derivativa tanto la respuesta del sistema como la señal de control mejoraron considerablemente. Esto se explica al considerar la constante de tiempo del sistema la cual es tan grande que no es necesario incluir una ganancia derivativa, puesto que usarla no aumentaría la velocidad de respuesta.

5.1.5 Resultados del control on-off

El proceso de enfriamiento del sistema es significativamente más desafiante que el proceso de calentamiento debido al medio ambiente de incubación, la arena. En este sentido, la temperatura del nido es siempre mayor que la temperatura ambiental. Además, las propiedades de la arena hacen que sea más difícil de enfriar por convección. Por esta razón consideramos necesario una revisión más profunda de este sub-sistema como punto central de un trabajo de investigación posterior.

El problema principal del sistema de enfriamiento se encuentra en que la bomba instalada para hacer fluir el agua dentro del serpentín presentó sobrecalentamiento cuando se puso a funcionar de manera contínua por lo que se optó por ponerla a funcionar de manera intermitente. Esta estrategia logró que el motor funcionara por más tiempo pero no eliminó el sobrecalentamiento. Una posibilidad es el reemplazo del motor por uno de mayores capacidades así el sistema de enfriamiento puede mejorar su desempeño.

Las pruebas del control on-off no pudieron ser completadas debido al sobrecalentamiento que presentó el motor. Por otro lado, la tarjeta de potencia también presentó sobrecalentamiento y por este motivo se añadieron disipadores a cada uno de los transistores. Durante esta prueba se decidió mantener la bomba encendida por 1 minuto y apagarla por 2 minutos. En la figura 5.4 se presenta el resultado de la prueba.

El tiempo de la prueba fue de 8 horas y 28 minutos. Como se observa en las gráficas de temperatura, la temperatura ambiental representada por la línea verde discontinua, varia en algunos momentos durante las 12 horas de la prueba.

Por otro lado, la temperatura del nido, representada por la línea azul continua, va disminuyendo gradualmente y no se ve afectada cuando existen cambios bruscos en la temperatura ambiental.

En la última sección de la gráfica se puede apreciar como la temperatura ambiental empieza a aumentar mientras que la temperatura del nido sigue disminuyendo al punto que la temperatura del nido logra alcanzar a la temperatura ambiental.

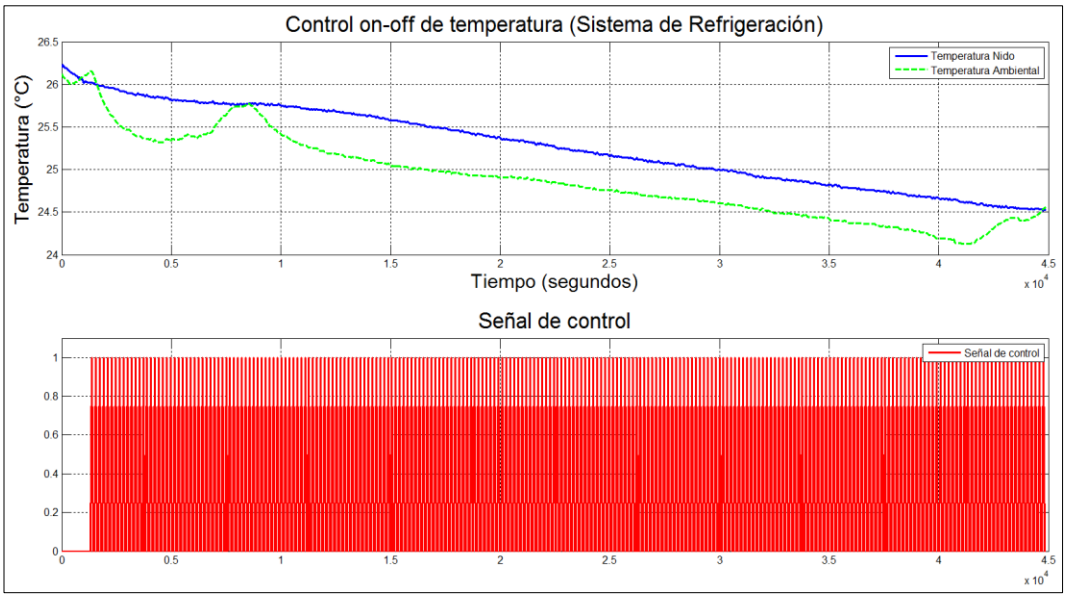


Figura 5.6 Resultados de la prueba experimental del control On-Off del sistema de enfriamiento.

Para dismimuir la temperatura de la arena no es suficiente con el serpentín de agua fría diseñado actualmente, se necesita desarrollar aún más este sistema si se quiere disminuir la temperatura utilizando únicamente el serpentín. Cabe mencionar que, la humedad que requiere el nido ayuda a enfriar el sistema de una manera más rápida. En un experimento se aplicó 40 ml de agua al nido con lo que pasó de una temperatura de 27.27°C a una de 25.06°C. Sin embargo, no podemos abusar del agua como medio para dismiuir la temperatura hasta que se definan las cantidades de humedad requeridas por los huevos de tortuga.

5.2 Resultados experimentales sobre la humedad

El control de lazo abierto tuvo los resultados esperados. Durante las pruebas experimentales se encontró que la bomba de agua tiene un capacidad de suministrar 3.5 litros de agua cada minuto con una manguera de plástico de un calibre de 10 mm

y un largo de 1.5 metros. El tiempo de encendido puede ser modificado directamente en el programa de la tarjeta Arduino.

La humedad requerida en el nido depende de la especie de huevo de tortuga marina y del tipo de arena. Ya que no se encuentran bien definidas las cantidades de referencia de humedad, únicamente se hizo una estimación sobre la cantidad de agua que se necesita en relación al peso del sustrato en el contenedor sugiriendo que el 6% es el grado de humedad idóneo para la incubación, como en un trabajo experimental visto en el capítulo 2.

Tipo de Arena	**Peso de la arena**	**Agua al 6%**	**Agua al 12%**
Playa	10 Kg	600 ml	1200 ml
Zeolita	5 Kg	300 ml	600 ml

Tabla 5. 6 Estimaciones de la cantidad de agua requerida por el nido según la clase de arena.

Este sistema de control de lazo abierto puede ser utilizado como una plataforma para hacer investigaciones más detalladas sobre la cantidad de agua por día que necesitan los huevos de tortuga para hacer eclosión. No se realizan mayores observaciones puesto que se necesita llevar a cabo pruebas de campo.

5.3 Resultados experimentales del desempeño del sistema en general

En general, el desempeño del sistema fue exitoso. Por un lado, el sistema físico fue diseñado de manera novedosa con materiales que son muy resistentes por lo que durante la realización de todas las pruebas no sufrieron ningún deterioro ni deformación.

Las tarjetas electrónicas funcionaron correctamente haciendo que todos los elementos actuadores funcionaran adecuadamente. A pesar de que la tarjeta de potencia del sistema de refrigeración se calienta ligeramente, los disipadores de calor ayudaron a que no se sobrecaliente.

Los elementos calefactores del sistema actuaron perfectamente, logrando alcanzar las temperaturas de incubación de tortugas hembras y macho. Estos elementos se lograron controlar mediante un control PI que tuvo un desempeño muy bueno. Por otra parte, el sistema de refrigeración no logró disminuir la temperatura significativamente por lo cual se recomienda seguir trabajando sobre esta etapa del sistema.

El programa implementado en la tarjeta Arduino también funcionó apropiadamente. La información de los sensores así como las señales de control para los distintos

elementos siempre fueron correctos en base a la metodología utilizada. Además de que la información de la temperatura y día de incubación son enviados correctamente a la interfaz de usuario.

Por otro lado, este trabajo fue presentado en las sesiones técnicas y de actualización tecnológica de la Conferencia Mexicana de Tecnología Humanitaria MHTC2015, así como en el 2° Concurso Estudiantil de Prototipos de Innovación Tecnológica en la categoría de Emprendimiento Social.

5.4 Propuesta de mejora en la respuesta del sistema empleando resorte para disminuir las vibraciones

El soporte con resortes mecánicos ajustados permitiría que los huevos se transporten de una manera más segura en las cuatrimotos. Un resorte mecánico es un elemento de máquina que posee la capacidad de acumular energía mecánica para liberarla oportunamente con el fin de ejercer fuerza, brindar flexibilidad o reducir vibraciones [65], debido a esto se espera que cierto porcentaje de las perturbaciones producidas durante el traslado en moto sean absorbidas por los resortes. La clase de resortes que son utilizados en el soporte son de tipo helicoidal.

Además, este soporte propuesto contempla la posibilidad de que los huevos puedan ser trasladados entre la arena que fue seleccionada por la propia tortuga. Esto representa una gran ventaja frente a la manera usual de trasladar exclusivamente los huevos en bolsas de plástico puesto que, en los campamentos para anidar los huevos se usa la arena que se encuentra en los corrales de protección. Sin embargo, con el paso del tiempo y tras varias temporadas de incubación esta arena se vuelve inservible debido a que se va ensuciando con materia orgánica y larvas de mosca por lo que es necesario trasladar todo el corral a una nueva zona. La comprobación experimental del funcionamiento de este soporte mediante pruebas de campo, está pensado en realizarse en la siguiente fase del proyecto de investigación.

Capítulo 6. Conclusiones generales

6.1 Conclusiones

En el presente trabajo se recopiló información sustancial para entender los factores que influyen en la incubación de los huevos de tortuga marina. Más aún, la información contenida en este documento sirve para comprender los problemas existentes relacionados a los bajos porcentajes de poblaciones de tortugas marinas y las necesidades de los campamentos tortugueros en el país la cual puede extenderse de forma generalizada a todo el planeta, ya que, en realidad depende de la especie a tratar de tortuga. Esta recopilación es fundamental para el diseño de un sistema artificial que permita a los huevos tener un buen desarrollo y aumentar su probabilidad de avivamiento.

De igual manera, en la presente tesis se ha mostrado la elaboración de un sistema artificial para incubar huevos de tortuga marina. El sistema físico se construyó en base a materiales resistentes que otorguen protección y seguridad a los huevos. La electrónica fue diseñada e implementada de acuerdo a los requerimientos de los sensores y actuadores del sistema.

MATLAB resulta ser una herramienta poderosa para aplicaciones en área de control e ingeniería de sistemas. En este trabajo se utilizó la herramienta "Identification System Toolbox" para obtener la función de transferencia de la incubadora. Más adelante, se utilizó la herramienta Simulink para simular y obtenerlas ganancias de sintonización del control PID.

Un aporte significativo de este trabajo es la implementación de un control de temperatura en sustratos, específicamente en arena. Se llevaron a cabo varios experimentos que evidenciaron el comportamiento del sistema con diferentes sustratos. La respuesta a la entrada escalón de estos sistemas es muy parecida, lo que resulta en la obtención de funciones de transferencia similares. Podemos concluir que el cambio de sustratos sólo impacta las constantes temporales de la función de transferencia del sistema y no implica un cambio significativo en la dinámica intrínseca del sistema.

Esta clase de sistemas tiene una respuesta muy lenta debido a que la conducción del calor se lleva a cabo a través de la convección, por lo que resulta más difícil y tardado calentar o enfriar un sustrato que el aire. Por esta razón, los sensores y actuadores son componentes críticos del sistema de control de lazo cerrado. La incubadora mostró una buena respuesta cuando el nido necesitaba ser calentado, sin embargo, el sistema de enfriamiento necesita más desarrollo para que el nido se pueda enfriar más.

La sintonización del PID es muy importante ya que de esto depende que nuestro sistema pueda mantener la temperatura deseada dentro del rango establecido. Los parámetros de control PID fueron ajustados utilizando tres métodos diferentes; por Simulink, por el método de Ziegler-Nichols y manualmente. Si bien el ajuste de ganancias utilizando Simulink y el método de Ziegler-Nichols funcionan bien en las simulaciones, los resultados experimentales son desfavorables. Estas ganancias calculadas con Simulink y Ziegler-Nichols sirvieron de base para realizar un ajuste de ganancias manual con el cual la respuesta del sistema mejoró y se logró el objetivo de controlar la temperatura deseada con un error de $\pm 1°C$.

Las ventajas que ofrece el sistema de incubación frente al proceso de incubación natural son: protección contra depredadores naturales y saqueadores, protección frente al mal clima como inundaciones o calor extremo, no se corre riesgo de que el nido colapse, se puede definir el sexo de la camada de tortugas en función de la temperatura, no se corre riesgo de que el nido se seque, cuenta con un sistema que da alarma a los supervisores si la temperatura es mayor o menor a la deseada.

Personalmente, este trabajo de investigación ha sido una experiencia invaluable y determinante no sólo para continuar haciendo investigación sino para darme cuenta de que el mundo donde vivimos necesita atención y soluciones basadas en nuevas tecnologías.

6.2 Trabajo futuro

Siendo este el primer prototipo de una incubadora de huevos de tortuga marina, se espera que mejores prototipos sean desarrollados en los próximos años. El sistema de enfriamiento puede ser mejorado aumentando el número de vueltas del serpentín, cambiando la bomba de agua o incluso incluyendo otra placa Peltier que permita enfriar el nido de manera más rápida y optimizando la etapa de potencia que permita mantener en funcionamiento el sistema por más tiempo.

La siguiente fase de este proyecto consiste en realizar pruebas con huevos de tortuga golfina para poder verificar que nazcan sin problemas. En dado caso, identificar los problemas que surjan y hacer las mejoras necesarias.

Por otra parte, la interfaz de usuario también puede ser mejorada; creando un historial de los valores de humedad y temperatura del nido; añadiendo controles manuales en la interfaz que permitan al usuario activar o desactivar los actuadores si lo considera necesario, lo cual dependerá en gran medida de contar con un sensor de humedad adecuado al sistema.

Con este prototipo desarrollado se espera que contribuya al desarrollo de experimentos biológicos para conocer de manera cuantitativa los porcentajes de humedad que requiere cada especie para su óptimo desarrollo. De ser posible esto, el control de humedad también podría ser mejorado.

Pese a que este trabajo fue realizado con diligencia, aún falta mucho camino por recorrer pero se confía en que futuras generaciones enriquezcan el proyecto y se logre un prototipo completamente funcional que de esperanza a la preservación de las tortugas marinas.

7. Referencias

[1] Especies de Tortugas Marinas en México: www.biodiversidad.gob.mx/especies/gran_familia/animales/reptiles/menuTortugas.html Fecha de consulta: septiembre 2014

[2] López Correa, et al. *A novel incubator to simulate the natural thermal environment of sea turtle eggs*. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN. Engineering Group, Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste. Journal of Thermal Biology vol 35, año 2010, p 138-142.

[3] www.testudines.org/es/articles/article/9604 Fecha de consulta: diciembre 2013

[4] www.monanimal.net/jaeger.html Fecha de consulta: noviembre 2015

[5] www.reptileincubator.com/ Fecha de consulta: diciembre 2013

[6] articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-477110129-incubadora-de-huevos-reptilesaves-reptipro-6000-pm0-_JM Fecha de consulta: diciembre 2013

[7] http://www.cites.org/esp/disc/parties/chronolo.php Fecha de consulta: septiembre 2014

[8] Diario Oficial de la Federación. Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010.

[9] Convención Sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre, Apéndices I, II y II año 2013, p 28.

[10] Peñaflores, et al. *Notas sobre el cultivo artificial del huevo de vientre de tortuga marina*. Instituto Nacional de Pesca. Mem. Recursos Pesca Costera de México, Veracruz, Ver., año 1976, p 221-236.

[11] Pritchard, et al. *Manual of sea turtles and conservation techniques*. Center of Environmental Education, Washington, D.C., segunda edición, año 1983, p 108.

[12] Wyneken Jeanette. *La anatomía de las tortugas marinas*. U.S. Department of Commerce. Año 2004, p 4.

[13] Pérez Abella. *Factores Ambientales y de manejo que afectan al desarrollo embrionario en la tortuga marina, Caretta caretta*. Universidad de las Palmas de la gran Canaria, Facultad de Ciencias del Mar. Tesis de doctorado, año 2010, p 4.

[14] Pfaller Joseph B., et al. *Nest-site selection in individual loggerhead turtles and consequences for doomed-egg relocation*. Conservation Biology, vol 23, año 2008, p 72-80.

[15] Patiño-MArtinez, J.A. *Factores ambientales que influyen sobre la reproducción de la tortuga Laúd (Dermochelys coriacea) en Colombia y sur de Panamá*. Aplicación a programas de manejo y conservación. Universidad de Salamanca. Tesis de doctorado, año 2010.

[16] Carrasco Aguila. *Estudio de los parámetros físicos que afectan en el avivamiento en nidos de la tortuga Lora (Lepidochelys Kempi, Garman, 1880).* Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia Posgrado Interinstitucional en Ciencias Pecuarias. Universidad de Colima. Tesis de maestria, año 2000 p 9-28.

[17] Tokunaga Shoji. *Temperature-dependent sex determination of a sea turtle, Caretta caretta, from Miyazaki, Japan*. Bull Kitakyushu Mus. Nat. Hist., año 1999, p 8:147-156.

[18] Booth, D. y Astill, K. *Incubation temperature, energy expenditure and hatchling size in the green turtle (Chelonia mydas), a species with temperature.-sensitive sex determination*. Australian Journal of Zoology, año 2001, p. 49.

[19] Deeming, et al. *Reptilian Incubation: environment, evolution and behaviour*. Nottingham University Press, año 2004.

[20] Bustard, et al. *Sea turtles, natural history and conservation*. Collins, London, año 1972.

[21] Hulin, et al. *Mixed and uniform brood sex ratio strategy in turtles: the facts, the theory, and their consequences*. Biology of turtles. University Press of Chicago, año 2007, p 279-300.

[22] Mrosovsky, et al. *Validation of incubation duration as an index of the sex ratio of hatchiling sea turtles*. Canadian Journal of Zoology, vol 77, año 1999, p 271-280.

[23] Godley, et al. *Thermal conditions in nests of loggerhead turtles: further evidence suggesting female skewed sex ratios of hatchling production in the Mediterranean*. Journal of Experimental Marine Biology ans Ecology, vol 263 (1), año 2001, p 45-63

[24] Msovsky, N. y Provancha, J. *Sex ratio of hatchling loggerhead turtles: Data and estimates from a 5-year study*. Canadian Journal of Zoology, vol 70, año 1992, p 530-538.

[25] Bustard, H.R. and P. Greenham. *Physical and chemical factors affecting hatching success in the green sea turtle, Chelonia mydas (L.)*. Ecology, año 1968, p 49:269-276.

[26] Pérez Abella. *Factores Ambientales y de manejo que afectan al desarrollo embrionario en la tortuga marina, Caretta caretta*. Universidad de las Palmas de la gran Canaria, Facultad de Ciencias del Mar. Tesis de doctorado, año 2010, p 9.

[27] McGehee, M.A. *Factors affecting the hatching success of loggerhead sea turtles egg (Caretta careta caretta)*. Thesis. B.S., Presbyterian College, U.S.A. año 1979, p 252.

[28] McGehee, M.A. *Effects of moisture on eggs and hatchlings of loggerhead sea turtles (Caretta caretta)*. Herpetologica, año 1990, p 46(3):251-258.

[29] Patiño-MArtinez, J.A. *Factores ambientales que influyen sobre la reproducción de la tortuga Laúd (Dermochelys coriacea) en Colombia y sur de Panamá*. Aplicación a programas de manejo y conservación. Universidad de Salamanca. Tesis de doctorado, año 2010.

[30] Mortimer, J.A. *Reducing threats to eggs and hatchlings: hatcheries*. IUCN/SSC Marine Turtle Specialist Group, Publ. No. 4, año 1999, p 175-178.

[31] Mortimer, J.A. *The influence of beach sand characteristics on the nesting behavior and clutch survival of green turtle (Chelonia mydas)*. Copeia, vol 3, año 1990, p 802-817.

[32] Mortimer, J. A. *Factor Influencing Beach Selection by Nesting Sea Turtles. In: (Ed., Bjorndal, K.) Biology and Conservationof Sea Turtles*. Preceedings of the World Conference on Sea Turtles Conservation, Washington, D.C., año 1982, p 45-51.

[33] Witzell, W.N. *Synopsis of biological data on the hawksbill turtle, Eretmochelys imbricate (Linnaeus, 1766).* FAO Fisheries Synopsis FIR/S137, año 1983, p 78.

[34] Hays et al. *Climate change and sea turtles: a 150-year reconstruction of incubation temperatures at a major marine turtle rookery.* Global Change Biology, vol 9, año 2003, p 642-646.

[35] Schmid, et al. *The effect of Australian Pine (Casuarina equisetifolia) removal on loggerhead sea turtle (Caretta caretta) incubation temperatures on Keewaydin island.* J. Coast. Res., vol 55, año 2008, p 214-220.

[36] Hannan, et al. *Dune Vegetation Fertilization by Nesting Sea Turtles.* Ecology, vol 88-4, año 2007, p 1053-1058.

[37] Pérez Abella. *Factores Ambientales y de manejo que afectan al desarrollo embrionario en la tortuga marina, Caretta caretta*, Universidad de las Palmas de la gran Canaria, Facultad de Ciencias del Mar. Tesis de doctorado, año 2010, p 7-11.

[38] www.acrilico-y-policarbonato.com/policarbonato.html Fecha de consulta: enero 2014

[39] www.aceroslevinson.com/plasticos/policarbonatos/policarbonatocelular/ Fecha consulta: enero 2014

[40] Marquez et al. *Memoria Anual de Actividades Realizadas en el Campamento Tortuguero de Rancho Nuevo, Tamaulipas, 1989, Tortuga Lora, Lepidochelys kempi.* Instituto Nacional de la Pesca, CRIP-Manzanillo, año 1990 p 55.

[41] es.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A1stico_reforzado_con_vidrio Fecha de consulta: enero 2014

[42] www.seeedstudio.com/depot/Soil-Moisture-Temperature-Sensor-p-1356.html Fecha de consulta: enero 2014

[43] Sensirion. SHT1x, Humidity and Temperature Sensor Data Sheet. Año 2008.

[44] Honneywell Humidlcon, 2011. Digital humidity/temperatura sensors: HIH-6130/ 6131 Series Data Sheet

[45] Sandoval G., et al. *Celdas Peltier: una alternativa para sistemas de enfriamiento con base en semiconductor.* Universidad Tecnológica de la Mixteca

[46] Texas Instruments. MOC3020 thru MOC3023 Optocouplers/Optoisolators Data Sheet. Año 1998.

[47] electronics-tutorials.ws/transistor/tran_4.html Fecha de consulta: enero 2014

[48] ST microelectronics. TIP31C Data Sheet. Año 2006

[49] Microchip. PIC16F84A Data Sheet. Año 2001.

[50] Philips Semiconductors. Data sheet PCF8574. Año 2002

[51] www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno Fecha de consulta: diciembre 2015

[52] www.4dsystems.com.au/product/uLCD_32PTU/ Fecha de consulta: marzo 2016

[53] Astrom J., Murray M. *Feedback Systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press, año 2009, p 23-25.

[54] Ogata K. *Ingeniería de control moderna*. Quinta edición. Prentice Hall, año 2010, p 13.

[55] www.mindat.org/min-1082.html Fecha de consulta: enero 2016

[56] brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginner%E2%80%99s-pid-sample-time/ Fecha de consulta: marzo 2016

[57] playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary Fecha de consulta: enero 2016

[58] Astrom J., Murray M. *Feedback Systems: an introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press, año 2009, p 302-303.

[59] www.uprm.edu/biology/profs/massol/manual/p2-humedad.pdf Fecha de consulta: diciembre 2015

[60] github.com/practicalarduino/SHT1x Fecha de consulta: enero 2016

[61] github.com/dhhagan/HIH6130 Fecha de consulta: enero 2016

[62] github.com/Seeed-Studio/RTC_DS1307_Suli. Fecha de consulta: enero 2016

[63] www.arduino.cc/en/Reference/Wire Fecha de consulta: enero 2016

[64] github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/ Fecha de consulta: enero 2016

[65] Gerez, Carlos. *Resortes mecánicos helicoidales*. Universidad de Buenos Aires, año 2014, p 3.

8. Anexo A Programa en Arduino

```
#include <SHT1x.h>      //Libreria sensor de Arena
#include <HIH6130.h>    //Libreria sensor Ambiental
#include <Wire.h>       //Libreria
#include "DS1307.h"     //Libreria reloj de tiempo real
#include <PID_v1.h>     //Libreria PID

#define dataPin     10 // Pin de datos-sensor de temperatura arena
#define clockPin    11 // Pin de reloj-sensor de temperatura arena
#define Monitor     0  // Aqui se define el dispositivo de salida (pantalla o monitor serial)

SHT1x sht1x(dataPin, clockPin); //Sensor de Arena SHT10
byte addressE = 0x27; //Dirección del sensor ambiental HIH6130
HIH6130 rhtE(addressE);
DS1307 clock; //Reloj de tiempo real


//Definimos las variables a usar en el PID
double Setpoint, Input, Output, signalControl;
//Especificamos los vínculos y parámetros de sintonización iniciales
double Kp = 0.5, Ki = 0.0002148, Kd = 0;
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
//Definimos la variable a usar
int state = 0;
int min0 = 0;

void setup() {
  //Inicializamos puerto serial
  Serial.begin(9600);
  //Inicializamos el PCF8574 para el driver de potencia
  Wire.begin();
  //Inicializamos sensor de temperatura exterior
  rhtE.begin();
  //Inicializamos reloj de tiempo real
  clock.begin();
  //Inicializamos las variables que vinculamos
  Input = (double) sht1x.readTemperatureC();//Temperatura de Arena
  Setpoint = 28; //Valor de Referencia
  if(Monitor == 1){
    // Imprime la cabecera de la tabla
    Serial.println("Hora (H:M:S) \tTemp. Nido (C)\t Humedad Ambiental (RH%)\tTemp. Ambiental (C)\tSeñal de Control (%)");
  }
  //Encendemos en PID en modo Automático
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);

  //Encendemos ventiladores y extractor de aire
  digitalWrite(0, HIGH);
  digitalWrite(1, HIGH);
  digitalWrite(2, HIGH);

  //Encendemos Ventilador y Placa Peltier
  digitalWrite(4, HIGH);
  digitalWrite(5, HIGH);

}

//Función para el driver de potencia
void write2Driver() {
  float signalControl = 194.0 * (1.0 - Output);
  unsigned char value;
  value = (unsigned char) round(signalControl);

  Wire.beginTransmission(32);
  Wire.write(value);
  Wire.endTransmission();
```

```
65    }
66
67  void loop() {
68    clock.getTime(); // Obten la hora
69    rhtE.readRHT(); // Obten la temperatura ambiental
70    Input = (double) sht1x.readTemperatureC();//Entrada del PID = a la temperatura
      de la arena
71    myPID.Compute();//Calcula el PID
72
73    //Si la temperatura de la arena es menor que la referencia
74    if (Input < Setpoint) {
75      write2Driver();//Envía señal de control al driver de potencia
76    }
77    //Si la temp de la arena es mayor a la referencia enciende el sistema de
      refrigeración
78    else {
79        digitalWrite(6, HIGH); //Encender Bomba Enfriadora
80     }
81
82    // Descripcion de la maquina de estados.
83    // Imprime la información en la pantalla o en el monitor serial cada minuto.
84    switch(state){
85      case 0:
86          /**************************************
87          Estado de Inicio (0):
88          Aqui se obtiene y almacena el minuto actual (min0).
89          Despues se hace una transicion inmediata al estado de espera (1).
90          **************************************/
91          clock.getTime();
92          min0 = clock.minute;
93          state = 1;
94          break;
95      case 1:
96          /**************************************
97          Estado de Espera (1):
98          Aqui se obtiene la hora actual.
99          Si el minuto actual es igual al minuto anterior (min0), se hace una
            transicion al estado de espera (1).
100         De otra forma, se almacena el minuto actual en (min0) y se hace una
            transicion al estado (2).
101         **************************************/
102         clock.getTime();
103         if (min0 == clock.minute){
104             state = 1;
105             break;
106         }
107         else {
108             min0 = clock.minute;
109             state = 2;
110             break;
111         }
112     case 2:
113         /**************************************
114         Estado de Impresion (2):
115         Aqui se envia la informacion para ser desplegada en la pantalla (0) o en
            el monitor (1).
116         Despues se hace una transicion inmediata al estado de espera (1).
117         **************************************/
118         unsigned char value[4] = {255, 3, 58, 12};
119         unsigned char *ptr = &value[1];
120         float temp_c;
121
122         if(Monitor < 1){
123             // Lectura del valor de la temperatura del sensor.
124             temp_c = sht1x.readTemperatureC();
125             // Cambio de representacion de la temperatura y conversion explicita a
```

```
            entero.
126             int conversion = (int)(temp_c * 100);
127             // El byte mas significativo de la conversion se almacena en la
                direccion en memoria de value[1].
128             *ptr = highByte(conversion);
129             ptr++;
130             // El byte menos significativo de la conversion se almacena en la
                direccion en memoria de value[2].
131             *ptr = lowByte(conversion);
132             ptr++;
133             // El dia del mes leido en el estado anterior se almacena en la
                direccion en memoria de value[3].
134             *ptr = clock.DayOfMonth;
135             // El apuntador se reinicia a su posicion inicial.
136             ptr = &value[1];
137             // La informacion guardada en "value" es enviada por el puerto serial
                a la pantalla.
138             Serial.write(value, sizeof(value));
139         }
140         else {
141             Serial.print(clock.hour, DEC);   // Imprime la hora.
142             Serial.print(":");
143             Serial.print(clock.minute, DEC); // Imprime los minutos.
144             Serial.print(":");
145             Serial.print(clock.second, DEC); // Imprime los segundos.
146             Serial.print("\t\t");
147             Serial.print(Input, DEC);        // Imprime la entrada del PID.
148             Serial.print("\t\t");
149             Serial.print(rhtE.humidity);     // Imprime la humedad del nido.
150             Serial.print("\t\t\t");
151             Serial.print(rhtE.temperature);  // Imprime la temperatura del nido.
152             Serial.print("\t");
153             Serial.println(Output);          // Imprime la salida del PID.
154         }
155         state = 1;
156         break;
157     }
158 }
```

9. Anexo B Programa pantalla

digits.4dg

```
#platform "uLCD-32PTU"

#inherit "4DGL_16bitColours.fnc"

#inherit "VisualConst.inc"

#inherit "digitsConst.inc"

#inherit "ledDigitsDisplay-ve.inc"

#constant BUF_SIZE  64

/* Funcion principal */
func main()
    /*************************************
    Aqui se espera hasta que la microSD sea insertada en la pantalla.
    La microSD contiene todas las imagenes que seran desplegadas.
    *************************************/
    putstr("Mounting...\n");
    if (!(file_Mount()))
        while(!(file_Mount()))
            putstr("Drive not mounted...");
            pause(200);
            gfx_Cls();
            pause(200);
        wend
    endif

    /* Se crea un "operador" para el manejo de archivos */
    hndl := file_LoadImageControl("digits.dat", "digits.gci", 1);

    /* Declaracion de variables */
    var numx := 4000;
    var numy := 0;
    var old_day;
    var starting := 1;
    var alarm := 0;
    var combuf[BUF_SIZE];
    var arduino[4] := [0, 0, 0, 0];
    var *ptr; ptr := arduino;

    /* Configuracion de la comunicacion serial, 9600 baudios */
    com_SetBaud(COM1, 960);
    com1_Init(combuf, BUF_SIZE - 1, 0);

    /* Despliega las imagenes al inicializar */
    img_Show(hndl, iLeddigits1);
    img_Show(hndl, iLeddigits2);
    img_Show(hndl,iLed1);

    /* Bucle infinito */
    repeat
        //El buffer serial se lee y se almacena en el arreglo "arduino".
        *ptr := serin1();
        if(arduino[0] >= 0)
            pause(10);
            for(ptr := &arduino[1]; ptr < &arduino[4]; ptr++)
                *ptr := serin1();
```

```
            next
            ptr := arduino;
        endif
        if(arduino[0] == 255)
            // La temperatura del sensor se guarda en la variable "numx".
            numx := ((arduino[1] * 256) + arduino[2]);
            if(!starting)
                // Si el dia guardado es diferente al recibido,
                // se aumenta el contador de dias de incubacion en 1.
                numy := (old_day != arduino[3]) ? (numy + 100) : numy;
            endif
            old_day := arduino[3];
            starting := 0;
        endif

        if(numx < 2700 || numx > 3300)
            // Si la temperatura es menor de 27°C o mayor a 33°C,
            // se activa la alarma.
            alarm ^= 0x01;
        else
            alarm := 0;
        endif

        /* Despliega los textos estaticos */
        img_Show(hndl,iStatictext1) ;
        img_Show(hndl,iStatictext2) ;
        img_Show(hndl,iStatictext3) ;
        img_Show(hndl,iStatictext4) ;

        /* Se imprime la temperatura y los dias de incubacion */
        ledDigitsDisplay(numx, iLeddigits1+1, 5, 4, 3, 30, 0) ;
        ledDigitsDisplay(numy, iLeddigits2+1, 5, 4, 3, 30, 0) ;

        /* Aqui se acciona la alarma */
        img_SetWord(hndl, iLed1, IMAGE_INDEX, alarm) ;
        img_Show(hndl,iLed1) ;

        /* Se despliega la temperatura en el termometro */
        img_SetWord(hndl, iThermometer1, IMAGE_INDEX, (numx / 100) - 10) ;
        img_Show(hndl,iThermometer1) ;

        if(numx < 2700 || numx > 3300)
            //Si la alarma esta activada, se reproduce el archivo de audio.
            file_PlayWAV("alarm0.wav");
            while(snd_Playing());
        endif
    forever
endfunc
```

10. Anexo C Programa driver de potencia

```
unsigned char value; //Variable global.

/* Esta función se ejecuta cuando se detecta una interrupción */
void Interrupt()
{
  /************************************
  Aquí preguntamos qué interrupción disparó esta función.
  Pueden ser sólo dos: Interrupcion Externa o Desborde del TIMER0.
  ************************************/
  if (TMR0IF_bit)
  {
    /************************************
    Desborde del temporizador (TIMER0)
    ------------------------------------
    Se modifica el registro INTCON.
    1) Se deshabilita la interrupción por desborde del temporizador (TIMER0).
    2) Se habilita la interrupción externa (INT0).
    3) Se limpia la bandera de interrupción por desborde del temporizador.
    ************************************/
    INTCON = 0x90;
    PORTA.B1 = 1;  //La salida al optocoplador es 1 (5V).
  }
  else
  {
    /************************************
    Interrupcion Externa
    Aquí se lee el puerto B y el LSB (Bit menos significativo) del puerto A.
    Después de almacena su valor en la variable "value".
    ************************************/
    value = (PORTB & 0xFE);
    if (PORTA.B0)
    {
      PORTA.B2 = 1;
      value++;
    }
    else
      PORTA.B2 = 0;
    /* Se limita a 195 el maximo valor de la variable "value" */
    if (value > 195)
      value = 195;
    TMR0 = (unsigned char)256 - value; // Se carga el resultado al temporizador.
    Este cuenta de forma ascendente de forma automática.
    /************************************
    Se modifica el registro INTCON.
    1) Se habilita la interrupción por desborde del temporizador (TIMER0).
    2) Se deshabilita la interrupción externa (INT0).
    3) Se limpia la bandera de interrupción externa.
    ************************************/
    INTCON = 0xA0;
    PORTA.B1 = 0; //La salida al optocoplador es 0 (GND).
  }
}

/* Función principal */
void main()
{
    TRISA = 0x01; //El PIN_A0, es entrada. Los demás pines del puerto A son salidas.
    TRISB = 0xFF; //Todo el puerto B entrada.
    PORTA.B1 = 0; //La salida se inicia en 0.
    /************************************
    Se inicializa el registro OPTION_REG
    1) Las resistencias de pull-up del puerto B son activadas.
    2) La interrupción externa (INT0) es disparada por un flanco de subida.
    3) El prescaler se asigna al modulo del TIMER0.
    4) El valor del prescaler es 1:128
    ************************************/
```

```
66        OPTION_REG = 0xC6;
67        INTCON = 0x90; //Se habilita la interrupción externa (INT0).
68        while(1)
69        {
70            /* Bucle infinito de espera */
71        }
72    }
```

11. Anexo D Programa en MATLAB

```
close all; % Cierra todas las ventanas de gráficos abiertas.
clear all; % Borra todas las variables almacenadas en la estacion de trabajo (workstation).
clc;       % Borra la información de la ventana de comandos.
filename = 'PIControl_Zeolita1.xlsx'; % Path relativo del archivo a abrir.
A = xlsread(filename); % Abre el archivo excel y lo convierte en una matriz que se almacena en 'A'.
B = size(A); % Se obtienen las dimensiones de la matriz A y se almacenan en B.
rows = B(1); % El número de filas de la matriz A se almacena en la variable 'rows'.
columns = B(2); % El número de columnas de la matriz A se almacena en la variable 'columns'.
t = A(1:rows, 1); % 't' es un vector de tamaño rows x 1.
t(1) = 0; % El primer elemento del vector 't' se vuelve cero (tiempo = 0).
for i = 2:rows
    t(i) = t(i-1) + 60; % Cada elemento del vector 't' es igual al anterior más 60.
end
u = A(1:rows, 5); % La señal de entrada se almacena en 'u'.
y = A(1:rows, 2); % La temperatura del nido se almacena en 'y'.
n = A(1:rows, 4); % La temperatura ambiental se almacena en 'n'.
x = A(1:rows, 6); % La temperatura dentro de la caja se almacena en 'x'. (Se puede comentar).
figure('Color', [1 1 1]); % El color de fondo de las gráficas será blanco.
subplot(2,1,1), % Se mostrarán dos gráficas. Se selecciona la primera.
plot(t, y, 'LineWidth', 2); % Se grafica la temperatura del nido contra el tiempo.
title('Control PI Temperatura', 'FontSize', 20); % Se coloca el título de esta gráfica.
xlabel('Tiempo (segundos)', 'FontSize', 18); % Se coloca una etiqueta en el eje de las abscisas.
ylabel('Temperatura (°C)', 'FontSize', 18); % Se coloca una etiqueta en el eje de las ordenadas.
hold on; % La grafica anterior se mantiene en la ventana.
plot(t, n, 'g', 'LineWidth', 2); % Se grafica la temperatura ambiental contra el tiempo.
hold on; % La grafica anterior se mantiene en la ventana.
plot(t, x, 'c', 'LineWidth', 2); % Se grafica la temperatura dentro de la caja. (Se puede comentar).
grid on; % La cuadrícula en la gráfica actual se activa.
subplot(2,1,2), % Se selecciona la segunda gráfica.
plot(t, u, 'r', 'LineWidth', 2); % Se grafica la señal de entrada del sistema.
title('Señal de Control', 'FontSize', 20); % Se coloca el título de esta gráfica.
q = axis; % Los limites de los ejes actuales se almacenan en 'q'.
q(4) = 1.1; % El limite de las ordenadas almacenado en q se cambia a 1.1.
axis(q); % Los limites de los ejes actuales se sobreesrciben.
grid on; % La cuadrícula en la gráfica actual se activa.
```



IEEE

SECCIÓN PUEBLA

Otorga la presente

C O N S T A N C I A

A

Ariana Tlacuatl Sánchez

Por su participación en las sesiones técnicas y de actualización tecnológica de la CONFERENCIA MEXICANA EN TECNOLOGÍA HUMANITARIA MHTC2015

Puebla, México del 18 al 20 de Marzo de 2015

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. FOUNDED NEW YORK 1884

Dra. Bertha Patricia Guzmán Velázquez
Presidenta IEEE Sección Puebla

Diseño de un Sistema de Control para una Incubadora de Huevos para Conservación de las Tortugas Marinas

Dra. Amparo Palomino Merino, Ariana Tlacuatl Sánchez
Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP

Objetivo general:

- Diseñar y construir un sistema de monitoreo y control de las condiciones físicas que determinan el sexo del embrión de tortuga marina y el porcentaje de avivamiento de los huevos.

Objetivos específicos:

- Diseñar una incubadora que cumpla con los requerimientos óptimos de número de huevos, limpieza, oxígeno, para la incubación de huevos de tortuga marina.
- Diseñar un control de temperatura para incubación exitosa de los huevos.
- Diseñar un control de humedad para incubación exitosa de los huevos
- Crear un sistema de amortiguamiento y así disminuir las perturbaciones en los huevos provocados durante su traslado en cuatrimotos.

Introducción

Con 6 especies en el mundo y 5 en México, las tortugas marinas comprenden un importante papel en el equilibrio de los ecosistemas marinos. En México desovan y se alimentan en los océanos Pacífico y Atlántico [1]. Son la caguama (Caretta caretta), la carey (Eretmochelys imbricata), la lora (Lepidochelys kempii), la golfina (Lepidochelys olivacea), la blanca (Chelonia mydas), la prieta (Chelonia agassizzi) así como la laúd (Dermochelys coriacea) que es la tortuga marina de mayor tamaño y es la única especie de esta familia. Desafortunadamente, todas las especies de tortugas marinas en México se encuentran en peligro de extinción [2].

Las tortugas marinas *Lepidochelys olivacea* es una de las más presentes en las costas mexicanas. En la Fig. 1 se aprecia su anatomía.

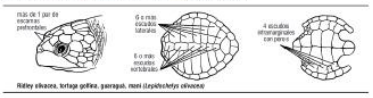


Fig 1. Anatomía de tortuga marina *Lepidochelys olivacea*.

Justificación

Debido a la grave preocupación que representan la disminución de sus poblaciones, diferentes instituciones oficiales y organizaciones no gubernamentales realizan trabajos en campamentos tortugueros, donde los objetivos principales son: proteger a las hembras que llegan a anidar, resguardar los nidos que son desovados en la playa y la liberación de crías al mar. Un buen ejemplo es toda la costa de Oaxaca en la que se encuentras variados campamentos de éste tipo. Fig. 2



Fig 2. Izq. La Ventanilla, Oaxaca. Der. Barra de Navidad, Oaxaca.

Cuando la tortuga deposita sus huevos en la playa, éstos quedan enterrados bajo la arena, durante por un periodo para continuar con su ciclo de vida, siendo una de las etapas más vulnerables al quedar expuestos a diversos fenómenos que provocan la pérdida de nidos, entre estos están: los huracanes, la erosión de la playa, inundaciones, sequías, depredación natural o el saqueo por humanos entre otros [5].

Los factores determinantes para un buen desarrollo del embrión así como una eclosión exitosa son la temperatura, la humedad, la limpieza de la arena, la cantidad de huevos por nido y la cantidad de oxígeno [9].

TABLA I. TEMPERATURAS DE ÍNCUBACIÓN DE LAS TORTUGAS GOLFINA, LAÚD Y CAREY

Nombre Común	Especie	Temperatura Machos	Temperatura Hembras	Temperatura Pivote
Tortuga golfina	*Lepidochelys olivacea*	<28°C	>32°C	28°C-32°C
Tortuga laúd	*Dermochelys coriacea*	27.28°C	31°C	28°C-31°C
Tortuga carey	*Eretmochelys imbricata*	28.4°C	30.8°C	28.4°C-30.8°C

Metodología

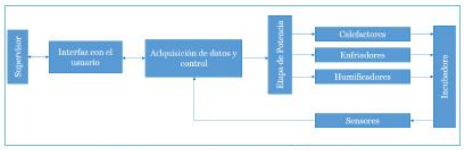


Fig. 3 Diagrama a bloques general del sistema

Diseño de la incubadora

La incubadora estará integrada por:

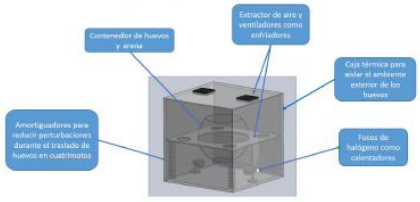


Fig 4. Incubadora de huevos de tortuga propuesto.

Además también contará con:

- Bomba de agua como humificador.
- Resistencias térmicas.

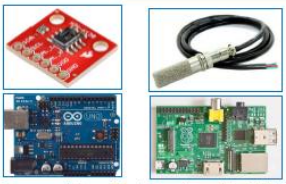


Fig. 5 Arriba izq: sensor de humedad y temperatura ambiental HIH6130. Arriba der: sensor de humedad y temperatura para sustratos TEM01162B. Abajo izq: Minicomputadora Raspberry Pi. Abajo der: Tarjeta electrónica Arduino UNO.

Conclusiones

- Se realizó visita a campamentos tortugueros para conocer su contexto, infraestructura y situación actual.
- Se ha realizado el diseño de un sistema de incubación de huevos de tortugas marinas de bajo costo que dará una solución tecnológica al problema que enfrentan los huevos de tortuga frente al cambio climático y la explotación ilegal.
- Se ha seleccionado la instrumentación del sistema. Los sensores son los capaces de desarrollar un buen desempeño frente a las condiciones de humedad, temperatura y la corrosión de la arena.

REFERENCIAS

[1] Especies de Tortugas Marinas en México: http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/gran_familia/animales/reptiles/menuTortugas.html

[2] Convención Sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre, Apéndices I, II y II (12/06/2013), 28 p.

[3] Peña Flores, C., M. et al., 1976. Notas sobre el cultivo artificial del huevo de vientre de tortuga marina. Mem. Recursos Pesca Costera de México, Veracruz, Ver., 1:221-236 p

[4] Carrasco Aguila, 2000. Estudio de los parámetros físicos que afectan en el avivamiento en nidos de la tortuga Lora (Lepidochelys Kempi, Garman, 1880). Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia Posgrado Interinstitucional en Ciencias Pecuarias. Universidad de Colima. 9-28 p.



La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

a través de la

Dirección de Innovación y Transferencia de Conocimiento

Otorgan el Presente

RECONOCIMIENTO

A: Ariana Tlacuatl Sánchez

Como Participantes con el Proyecto **DITCo-4** del
"2° Concurso Estudiantil de Prototipos de Innovación Tecnológica"
en la categoría **Emprendimiento Social**

Atentamente
"Pensar bien para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, a 14 de Septiembre de 2015

Dr. Pedro Hugo Hernández Tejeda
Dirección de Innovación y
Transferencia de Conocimiento

BUAP DITCo / CUV / CICE