



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y Control de Temperatura-Humedad
en una Incubadora de Huevos.

T E S I S
QUE PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO
P R E S E N T A N:
JESÚS GARNICA ALBOR
VÍCTOR ARTURO MARTÍNEZ LÓPEZ

Director de tesis:
M.I. JUAN CARLO RIVERA DUEÑAS



MÉXICO, D.F.

2011

Agradecimientos

A **Dios** por haberme dado la oportunidad de encontrar mi camino y ayudarme a encontrar una solución en los momentos más difíciles de mi vida.

A **mis padres** Angel y Andrea por apoyarme a pesar de todas aquellas diferencias que hemos tenido como familia.

A **mis hermanos** Carmen, Adan, Amador y Luz que principalmente son con los que he convivido más tiempo de mi vida.

A **Vianeit** que me ha apoyado incondicionalmente y ha sido la que me ha animado a seguir adelante para terminar lo que empecé.

A **Víctor** que hemos compartido muchas ideas juntos desde que empezamos este proyecto.

A **Luis** que es un buen amigo en el que puedo confiar.

A **mis profesores** que me regalaron un poco de su sabiduría y que me ayudaron encontrar el camino hacia lo que realmente quise ser.

A **la Universidad** por darme la oportunidad de ser parte de ella y tener presente que siempre seré parte de ella.

A **todas aquellas personas** que me han animado para terminar esta tesis.

Jesús Garnica Albor

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y por haberme ayudado a superar todas las dificultades que se interpusieron en mi camino.

A mis padres Eric y Laura por guiarme por el camino del bien y por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

A mis abuelos Mim, Mimi, Arturo y Gil⁺ por inculcar en mi el gusto por la ciencia, por sus palabras sabias y su gran apoyo.

A mi hermana Lorena por los momentos buenos y malos que hemos tenido y que han ayudado a mi formación personal.

A mis maestros por compartir sus conocimientos y experiencia y ayudar a mi formación profesional.

A la UNAM por darme la oportunidad de realizar mis estudios con una alta preparación académica y humana.

A todas las personas que me han apoyado a lo largo de la realización de esta tesis, en especial a Alessandra, por motivarme a seguir siempre adelante.

A todos ustedes, ¡Gracias!

Víctor Arturo Martínez López

Los autores agradecemos al Dr. Marco A. Juárez Estrada de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la UNAM por su apoyo durante esta tesis, así como a la D.G.A.P.A.- U.N.A.M. por el apoyo otorgado a través del proyecto PAPIIT IN 220909-3, "Evaluación del Incremento de CO₂ en la etapa temprana de incubación sobre el desarrollo embrionario en aves domésticas."

También agradecemos a nuestros sinodales: M.I. Bernardo Frontana de la Cruz, M.I. Juvenal Ing. Alejandro Sosa Fuentes, Ing. Alberto Ramiro Garibay Martínez y M.I. Antonio Salvá Calleja por sus aportaciones, observaciones y críticas a esta tesis que permitieron hacer un mejor trabajo.

«We have forty million reasons for failure, but not a single excuse»

-Ruyard Kipling (1865-1936)

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo	1
1.2. Estado del Arte	2
2. Factores que influyen en la incubación	3
2.1. Características y necesidades del huevo de gallina.	3
2.2. Requerimientos técnicos	4
2.2.1. Otros factores a considerarse	6
2.2.2. Causas comunes de fallo en la incubación	7
2.3. Tipos de Incubadoras	7
3. Diseño de la incubadora y de circuitos	11
3.1. Sistema mecánico	11
3.2. Sensores y Actuadores	13
3.2.1. Sensores	13
3.2.2. Actuadores	15
3.3. Circuitos Electrónicos	16
4. Interfaz de Usuario	25
4.1. LabView	25
4.1.1. Configuración del Puerto Serie	25
4.1.2. Programación del Panel Frontal (Panel de supervisión)	29
4.2. Creación de Subrutinas	30
4.3. Planeación de Trayectorias	34
5. Controladores	45
5.1. Modelo Dinámico	46
5.1.1. Conceptos Preliminares	46
5.1.2. Modelos propuestos	48
5.1.3. Modelo Utilizado	49
5.2. Control ON-OFF	52
5.3. Control PID	52
5.4. Control por Retroalimentación de Estados	53
6. Resultados Experimentales	57
7. Conclusiones y Recomendaciones	65
7.1. Ventajas y Desventajas	66
7.2. Trabajo Futuro	67

A. Galería de Fotos	71
B. Especificaciones de los Sensores y Actuadores utilizados	75
C. Programa del microcontrolador	79
C.1. Giro del motor a pasos	79
C.2. Rutina de retardo	80
C.3. Programa completo	81

Índice de figuras

2.1. Estructura del huevo	3
2.2. Temperatura de un huevo de pavo incubado a 37.7 [°C]. El pollo nació al día 26 [10].	5
2.3. Volteo de los huevos	6
2.4. Incubadora GQF Hova-Bator 1583	8
2.5. Sistema de Volteo para incubadoras Hova-Bator	8
2.6. Incubadora GQF Sportsman	9
3.1. Esquema del Sistema de humedad	12
3.2. Esquema del Sistema de Ventilación	12
3.3. Sistema de Volteo	13
3.4. Voltaje de salida vs. Temperatura del modulo de humedad HMZ	14
3.5. Ajuste de la lectura del sensor de humedad	15
3.6. Secuencia de excitación	15
3.7. Diagrama de bloques de la incubadora	18
3.8. Fuente de Alimentación	19
3.9. Sensor Básico de Temperatura (+2 °C a +150 °C) [13]	20
3.10. Circuito Promediador	20
3.11. Circuito del sistema de alarma	21
3.12. Circuito Detector de Cruce por Cero	21
3.13. Generador rampa a una frecuencia de 120Hz	22
3.14. DAC de 4 bits con un amplificador TL084	22
3.15. Señales involucradas en el proceso de control de potencia	23
3.16. Diagrama electrónico para el control de la humedad y la temperatura	24
3.17. Circuito del Driver del Motor a Pasos	24
4.1. Vista de la ayuda contextual de LabView correspondiente al VI <i>VISA Configure Serial Port</i>	26
4.2. Registro de configuración SCC1	27
4.3. Registro de configuración (SCC2)	27
4.4. Registro de selección de baudaje (SCBR)	28
4.5. Registro de estados SCS1	29
4.6. Panel Frontal	30
4.7. Indicadores de Temperatura (izq) y Humedad Relativa (der)	31
4.8. Perillas para ajuste manual de las referencias	35
4.9. Indicadores del estado de la comunicación.	36
4.10. Secuencia para conectar la incubadora	37
4.11. Protocolo de comunicación serial	37
4.12. Primera parte del SubVI de transmisión serial	38

4.13. Segunda parte del SubVI de transmisión serial	38
4.14. Conversión de los caracteres leídos a valores numéricos	39
4.15. Invocación del SubVI responsable del control y envío del resultado al MCU.	39
4.16. Diagrama de bloques del SubVI contador de tiempo	40
4.17. Primera parte de la subrutina «Contador de tiempo»	40
4.18. Segunda parte de la subrutina «Contador de tiempo»	40
4.19. Lectura del archivo de referencia	41
4.20. Ejemplo de conversión a caracter	41
4.21. Convertidor a caracter	41
4.22. Aproximación de la integral como suma de trapecios	42
4.23. Trayectoria de Temperatura	42
4.24. Trayectoria de Humedad Relativa	43
5.1. Diagrama de bloques adaptado de Ogata [17] para la Incubadora	45
5.2. Carta psicrométrica a 2250 msnm	47
5.3. Sistema térmico	48
5.4. Diagrama de bloques del sistema	49
5.5. Brecha diferencial de un control ON-OFF	53
5.6. Diferencia entre los controladores	54
5.7. Sistema retroalimentado	55
5.8. Resultado de una simulación aplicando control tipo regulador en lazo cerrado	56
6.1. Gráfica que muestra el comportamiento del sistema con un controlador ON-OFF para temperatura	58
6.2. Gráfica que muestra el comportamiento del sistema con un controlador ON-OFF para humedad relativa	60
6.3. Control PID con oscilaciones sostenidas	60
6.4. Control PID con ganancias óptimas	61
6.5. Control PID siguiendo un cambio en la referencia	61
6.6. Gráfica de la temperatura en la incubadora utilizando control en el espacio de estados.	63
6.7. Gráfica de la RH en la incubadora utilizando control en el espacio de estados.	63
A.1. Vista superior del gabinete	71
A.2. Vista lateral del gabinete	71
A.3. Detalle del compartimiento de la electrónica en el exterior del gabinete.	72
A.4. Sistema de humedad	72
A.5. Sistema de Ventilación	73
A.6. Sistema de Volteo	73
A.7. Circuito del microcontrolador	74
B.1. Sensor de Temperatura LM35	76
B.2. Sensor de Humedad HMZ-433A1	77
B.3. Motor a Pasos	78

Lista de Tablas

2.1. Efecto de variar la velocidad del ventilador ([RPM]) en la velocidad del aire sobre los huevos, temperatura entre los huevos e incubabilidad en dos puntos dentro de la incubadora [10]	6
2.2. Variación de la incubabilidad dependiendo del número de días que se aplica el volteo .	6
2.3. Causas comunes de fallo en la Incubación [18].	7
3.1. Datos para el giro del motor	16
4.1. Parámetros de configuración del puerto serie en el VI mencionado en la fig 4.1	26
4.2. Valor de los registros para la configuración del puerto serie	28
4.3. Formato del Archivo de Referencias	32
4.4. Temperaturas de Incubación y Humedad Relativa	35
5.1. Nomenclatura	50
5.2. Valor de las constantes en unidades del SI	52
7.1. Análisis del Control ON-OFF	66
7.2. Análisis del Control PID	66
7.3. Análisis del Control por retroalimentación de estados	69
7.4. Ventajas y desventajas de la incubadora	70

Capítulo 1

Introducción

Las incubadoras son máquinas pensadas para sustituir el ambiente de incubación proporcionado por la gallina al huevo para que éste se desarrolle de manera óptima. Aunque son muchas las variables que intervienen, las incubadoras pequeñas se centran en proveer una adecuada temperatura y humedad relativa a los huevos, por lo que el problema principal es conseguir los niveles adecuados de las variables mencionadas; de no hacerlo de manera correcta o si se excede de los límites, los pollos presentarán defectos o morirán antes de nacer.

¿Cómo se logra? Dado que las incubadoras se construyen de manera casera en muchas ocasiones, la manera más sencilla es utilizar un elemento que al llegar a la temperatura indicada apague los calefactores (focos incandescentes o resistencias), mientras que la humedad se logra colocando un espejo de agua para que, mediante evaporación, se humedezca el ambiente lo necesario. A este tipo de control que consiste en 2 posiciones se le conoce como control prendido-apagado o control ON-OFF.

Así pues, esta tesis pretende analizar el comportamiento de este tipo de control para utilizarlo como referencia y proponer controladores que mejoren el desempeño de la máquina; se mencionan en primer lugar, los avances que han tenido las incubadoras, seguido de los requerimientos de un huevo para su correcta incubación (capítulo 2); el capítulo 3 describe la construcción del prototipo basado en los requerimientos.

Se creó una interface gráfica con el fin de monitorear la actividad en la incubadora y éste se describe en el capítulo 4. Posteriormente, en el capítulo 5 se explica brevemente el fundamento de los controladores empleados así como el modelo matemático para el análisis del sistema (incubadora). Tras haber definido los conceptos necesarios, en el capítulo 6 se muestran los resultados obtenidos a partir de pruebas con el prototipo. Éstos datos fueron analizados para finalmente obtener las conclusiones derivadas del experimento.

1.1. Objetivo

El objetivo de esta tesis es proponer controladores distintos del controlador ON-OFF (Encendido-Apagado) de temperatura y humedad enfocados a una incubadora de huevos pequeña que permita mejorar el desempeño de las variables controladas. Por otra parte se diseñará una propuesta para el sistema de volteo.

Para lograr esto se construirá un prototipo que simula la mencionada incubadora, misma que se instrumentará y se diseñará un sistema de adquisición de datos para enviarlos a una computadora vía puerto serie (RS232). Una vez que sean probados los controladores se analizará su respuesta para concluir cuál de ellos es la mejor opción para la aplicación mencionada. Con el fin de tener una referencia, se implementará un controlador ON-OFF y, basándose en los resultados de éste se

compararán los demás. Finalmente se propondrá un modelo matemático que se adecúe al prototipo fabricado.

1.2. Estado del Arte

Los avances en incubadoras pequeñas (menos de 1000 huevos) han sido muy lentos. Esto debido quizá a lo relativamente fácil que es construir una incubadora casera. Este tipo de aparatos utiliza controles rudimentarios: termostatos mecánicos para control de temperatura, espejo de agua para humedad y movimiento manual para rotar los huevos. El calefactor es una bombilla incandescente mientras que la ventilación se lleva a cabo por convección natural. Si se consulta la referencia [9] se puede encontrar una incubadora de este tipo y así como este sitio web existen varios que básicamente explican la misma técnica.

El siguiente nivel de tecnificación de una incubadora de este tipo consiste en sustituir la bombilla por una resistencia eléctrica, mientras que para el control se utiliza un termostato electrónico como el comercializado por Incubadoras Horus en Argentina [4]. La ventilación puede ser natural o forzada incorporando un pequeño ventilador.

Las incubadoras más avanzadas incluyen un sistema de volteo automático, calefacción por medio de resistencias, ventilación forzada, termostato electrónico y una bandeja de agua para la humedad.

En las referencias [1] y [4] pueden encontrarse este tipo de incubadoras siendo las más usuales.

Otra innovación interesante es que algunas incorporan un humidificador en lugar del espejo de agua mientras que otras sustituyen el termostato electrónico por un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) [5]. La medición se hace por medio de un termómetro (bulbo seco y bulbo húmedo) o bien mediante un termómetro y un psicrómetro.

Un nivel de automatización más elevado fue realizado por estudiantes del Instituto Politécnico Nacional (IPN) a principios del 2011 al crear un prototipo totalmente automatizado que incluso puede administrarse de manera remota vía Bluetooth. La calefacción se lleva a cabo introduciendo aire caliente y se controla por medio de unos ventiladores que se encienden si la temperatura excede cierto nivel. El sistema de volteo es automático; además, la incubadora posee una pantalla de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) para visualizar la información de temperatura y humedad relativa [16].

Capítulo 2

Factores que influyen en la incubación

2.1. Características y necesidades del huevo de gallina.

Antes de explicar los requerimientos técnicos de la incubadora es necesario conocer la estructura del huevo de gallina.

El huevo de gallina se compone de 5 capas: cáscara, membranas, albúmina, chalaza, y yema; como se muestra en la Figura 2.1.

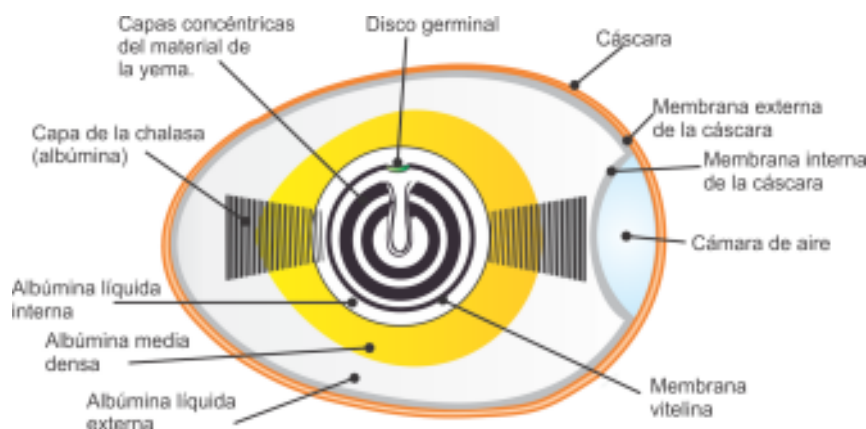


Figura 2.1: Estructura del huevo

La cáscara está constituida principalmente por carbonato de calcio; es porosa y permite el intercambio de humedad, oxígeno y dióxido de carbono. Además forma una cubierta protectora para el contenido fluido del huevo. La cáscara tiene 2 capas (membranas) y entre ellas, en el extremo más grueso del huevo, se encuentra la cámara de aire, de donde el embrión tomará el oxígeno justo antes de la rotura del huevo.

La albúmina (clara del huevo) está formada de 4 partes de las cuales, tres de ellas forman capas alrededor de la yema. La chalaza se encuentra adherida a la yema y a la parte media de la albúmina, sirve como amortiguador y para mantener a la yema en una posición central. Las bandas de la chalaza se encuentran en dirección opuesta.

La yema constituye un almacén de sustancias nutritivas para el pollo en incubación. Está rodeada por una membrana llamada *membrana vítelina* y sobre ésta se encuentra la célula germinal femenina

o *blastodisco*, que si fue fertilizada por un espermatozoide se convertirá en el disco germinal e iniciará el desarrollo del pollo [18].

2.2. Requerimientos técnicos

Para llevar a cabo una incubación natural (con gallina clueca) o artificial (en incubadora) eficazmente se consideran los siguientes factores:

Temperatura.- La temperatura óptima para incubación es de $37.8 [^{\circ}\text{C}]$ en el centro del huevo. Esto es importante debido a que el huevo tiene varias capas y la célula germinal se encuentra en el centro. Cada capa funcionará como un aislante térmico, por lo que la temperatura en el exterior no necesariamente es la misma que en el interior. French (1997) establece que la temperatura del embrión puede ser inferior a la del incubador durante la primera mitad de incubación debido al enfriamiento por evaporación y mayor durante la segunda etapa por el calor metabólico que produce el huevo. Durante la primera mitad de incubación el embrión tomará calor del ambiente mientras que en la segunda lo producirá [10]. Quintana (2003) menciona que para incubadoras con aire en reposo la temperatura se mide en la superficie del huevo y es de $39.4 [^{\circ}\text{C}]$ mientras que para las incubadoras de aire forzado bastará una lectura de $37.8 [^{\circ}\text{C}]$ [19]; sin embargo, antes de hacer esta suposición se considera que la resistencia térmica del cascarón varía con la velocidad del aire alrededor del huevo, por lo que si no existe un buen flujo de aire alrededor del huevo no se puede garantizar que la temperatura que marca la incubadora es la misma que tiene el embrión. La temperatura que experimenta éste está determinada por tres factores: la temperatura de la incubadora, la capacidad de calor que pasa de la incubadora al embrión y el calor metabólico producido por el embrión; sin embargo, muchos estudios sólo consideran la temperatura de la incubadora [10]. En la Figura 2.2 se presenta una gráfica de temperatura durante un periodo de incubación.

Los efectos de una temperatura inadecuada dependerán del tiempo aplicado y de la magnitud de ésta, pero pueden producir alta mortalidad embrionaria así como malformaciones. Los embriones son más susceptibles a altas que a bajas temperaturas y tan sólo una pequeña desviación de la que se considera óptima es suficiente para producir secuelas [10].

Humedad Relativa.- La Humedad Relativa (RH) puede variar más que la temperatura pero deberá permanecer alrededor del valor óptimo que se encuentra entre 55% y 60%. El porcentaje de humedad relativa variará dependiendo del tamaño y color del huevo. De haber un exceso de humedad relativa, los pollos pueden morir dentro del cascarón, quedar pegados a éste o nacer blandos y húmedos [18]. Una humedad no controlada adecuadamente hace que los pollos nazcan deshidratados, que piquen el cascarón y no eclosionen o que nazcan con el plumón corto [19].

La medición de la humedad relativa se lleva a cabo tradicionalmente tomando las lecturas de bulbo seco y bulbo húmedo y se consultan tablas que proporcionan el valor de humedad relativa. Otra manera de hacer la medición es mediante el uso de un psicrómetro; sin embargo, para el diseño de la incubadora se utilizó un sensor electrónico.

Ventilación.- La ventilación cumple tres funciones importantes:

1. Proporcionar aire del exterior para permitir la respiración del embrión y mantener entre un 21 y 22% de oxígeno en la incubadora.

La altura sobre el nivel del mar afecta a la incubación, a 915[m] sobre el nivel del mar ocurre 10% de mortalidad embrionaria y a 2000[m] se eleva a 21%. Para disminuir la mortalidad se recomienda añadir oxígeno extra hasta 22%, pues el embrión es incapaz

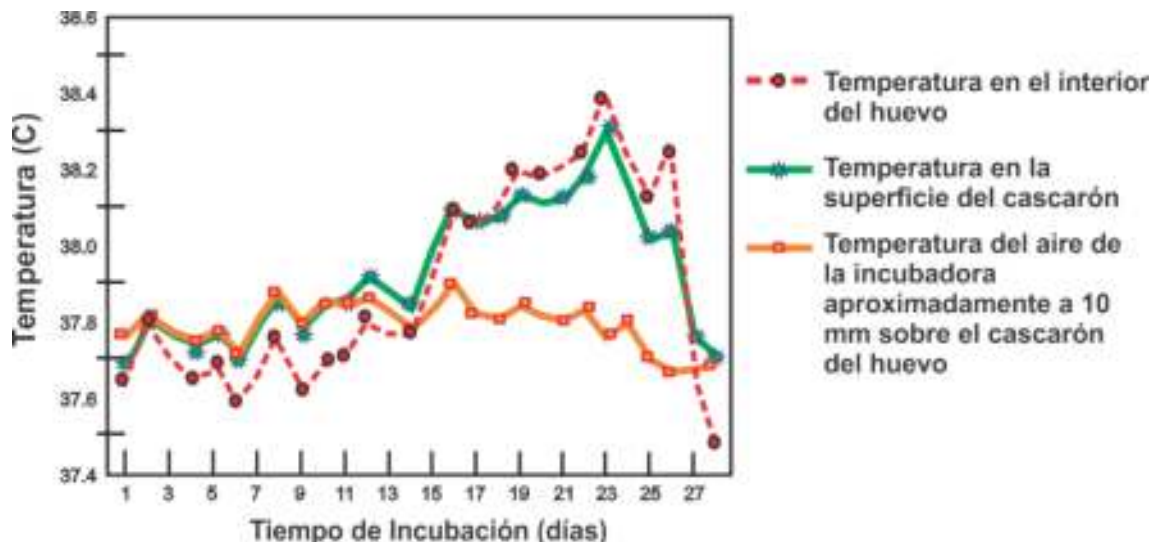


Figura 2.2: Temperatura de un huevo de pavo incubado a 37.7 [°C]. El pollo nació al día 26 [10].

de producir suficiente hemoglobina que compense la disminución de oxígeno en la incubadora.¹

2. Expulsar en anhídrido carbónico (CO_2) así como mantener el mismo en un nivel inferior al 0.5% sin rebasar nunca el 1%; además de expulsar también otros gases perjudiciales.
3. Repartir uniformemente la temperatura y la humedad en la incubadora.

La ventilación y la temperatura *del huevo* están relacionados de acuerdo con lo siguiente:

El aumento en la temperatura del aire conforme pasa sobre los huevos es inversamente proporcional al flujo del volumen de aire y por lo tanto el control uniforme de la temperatura del huevo dentro de la incubadora depende del movimiento uniforme del aire alrededor de los huevos²

Se han hecho estudios que investigan la relación entre la temperatura del aire que rodea a los huevos y la incubabilidad. La tabla 2.1 muestra que al aumentar la velocidad del motor también lo hace la velocidad del aire sobre los huevos y la temperatura disminuye. De ahí se ha llegado a la conclusión de que *la velocidad del aire tiene un gran impacto en la conductividad térmica del huevo y por lo tanto en la incubabilidad* [10].

Anteriormente se mencionó que hay estudios que demuestran la importancia de la velocidad del aire en la incubadora; sin embargo, hay pocos datos reportados de la velocidad del aire entre las charolas. Las velocidades observadas para incubadoras de huevo de gallina varían entre 0.1 y 3.0 [m/s].

Volteo de los huevos.- Los huevos se deben rotar por cuatro razones principales: para evitar que las membranas embrionarias se peguen, para que el embrión tenga una buena orientación; para una

¹QUINTANA, José Antonio, *Avitecnia: manejo de las aves domésticas más comunes*, 3a ed. México: Trillas 1999 (reimp 2003). p. 255

²FRENCH, N.A. Modelling Incubation Temperature: The effects of Incubator Design, Embryonic Development and Egg Size, *Poultry Science*, 1997

Variable	Posición de la charola	Velocidad del motor		
		60 [RPM]	120 [RPM]	180 [RPM]
Velocidad del aire ([m/s])	Centro	0.20	0.45	0.62
	Inferior	0.99	2.10	2.80
Temperatura ([°C])	Centro	39.4	38.6	38.8
	Inferior	38.9	38.7	38.1
Variación de la incubabilidad en base a 120 [RPM]. (%)	Centro	-23.2	0	+0.4
	Inferior	-2.9	0	-0.1

Tabla 2.1: Efecto de variar la velocidad del ventilador ([RPM]) en la velocidad del aire sobre los huevos, temperatura entre los huevos e incubabilidad en dos puntos dentro de la incubadora [10]

mejor distribución del aire y, para evitar que el embrión se adhiera a la pared del huevo [18]. Los huevos se colocan con el polo obtuso hacia arriba, pues la cabeza del pollo normalmente sale por este polo. Posteriormente se giran de manera que formen un ángulo de 45° a 50° grados sobre la vertical (Figura 2.3).



Figura 2.3: Volteo de los huevos

Los huevos se deben voltear por lo menos 8 veces al día para aumentar la incubabilidad y su necesidad es mayor en los primeros 18 días de incubación. Después de este día ya no se requiere. La tabla 2.2 muestra como varía la incubabilidad dependiendo del número de días que se realiza el volteo [19].

Días para realizar el volteo	Porcentaje
Ninguno	29
Los primeros siete días de incubación	78
Los primeros 14	95
Los primeros 18	92

Tabla 2.2: Variación de la incubabilidad dependiendo del número de días que se aplica el volteo

2.2.1. Otros factores a considerarse

De acuerdo con Quintana (2003), existen otros factores que no dependen de la incubadora pero debe tenerse en cuenta por la persona que realizará la incubación, como:

- Edad de las reproductoras: el tiempo de incubación variará con la edad del ave. Los huevos producidos por reproductoras jóvenes requieren menos tiempo de incubación.
- Tiempo de almacenamiento: Entre mayor tiempo se mantengan los huevos almacenados, el porcentaje de nacimiento desciende. En general, si se tienen condiciones adecuadas de humedad y temperatura el porcentaje de nacimientos disminuye entre 1 y 1.5 % por cada día de almacenamiento.
- Tamaño: Los huevos que pesan 65 [g] o más nacen en general 12 horas después que los demás.
- Tipo de huevo: El huevo rojo requiere 2 horas más de incubación que el blanco.
- Higiene de la planta: Se realiza para evitar problemas por contaminación debido a que la cáscara del huevo es porosa y cualquier material sucio puede penetrar a las membranas de la cáscara.

2.2.2. Causas comunes de fallo en la incubación

A continuación se enlistan las principales consecuencias por una incubación inadecuada:

Defecto	Causa probable
Nacimiento temprano	Temperatura demasiado elevada
Pollos demasiado blandos	Temperatura demasiado alta
Retraso en el nacimiento	Temperatura baja, huevos sucios
Pollos pequeños	Humedad insuficiente, huevos pequeños
Muchos embriones muertos en la cáscara	Rotación inadecuada, nutrición inadecuada y otros
pollos débiles	Exceso de calor en la última etapa de incubación

Tabla 2.3: Causas comunes de fallo en la Incubación [18].

2.3. Tipos de Incubadoras

Las incubadoras que se presentan a continuación son algunos de los tipos que se tienen instaladas en la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la UNAM que son manejadas por el personal y alumnos del Dr. Marco A. Juárez Estrada del Departamento de Producción Animal (DPA): Aves.

Éstas incubadoras son pequeñas y van desde 48 huevos hasta cerca de 250 huevos de gallina. Son de la marca GQF y están hechas en EUA.

Al consultar el sitio web [1] se obtienen las características de este tipo de incubadoras, las cuales se resumen a continuación:

- **Tipo Hova-Bator modelo 1583.** Es de unicel con una ventana en la tapa. Contiene una resistencia de 25 [W] y un ventilador pequeño para que circule el aire. El control de temperatura se realiza por medio de un termostato de oblea y se ajusta manualmente. El control de humedad se lleva a cabo por medio de evaporación. No cuenta con sistema de volteo integrado pero la empresa vende un sistema de volteo automático (fig. 2.5) con capacidad para 6 charolas de 8 huevos de gallina cada una. Cuenta también con la opción para incubar pato, codorniz, ganso y otras especies. El motor es de 110 [V] de corriente alterna (VAC) y es de movimiento continuo; es decir, los huevos nunca se quedan en una posición fija y siempre están en movimiento (fig. 2.4).



Figura 2.4: Incubadora GQF Hova-Bator 1583



Figura 2.5: Sistema de Volteo para incubadoras Hova-Bator

- **Tipo Sportsman.** Esta incubadora es de un material similar al aglomerado con melamina. Tiene capacidad para cerca de 250 huevos de gallina e incluye algunas funciones de automatización: un microcontrolador monitorea la humedad y la temperatura desplegándolos en un display LCD. El termostato es electrónico y en algunos modelos se cuenta además con un termostato de oblea de respaldo, en caso de que el primero falle. El control de humedad es por medio de evaporación. Funciona con 110 [VAC] y la resistencia es de 325 [W] (Figura 2.6).

Una de las incubadoras que se utilizan en el Laboratorio de Virología del DPA, cuenta con una incubadora similar a la Sportman, pero de manufactura mexicana. Es el mismo diseño pero incorpora un humidificador (como los utilizados para las habitaciones de los niños pequeños) activado por un control ON-OFF. En lugar de tener display LCD cuenta con indicadores de 7 segmentos.

Obviamente aquí se describieron incubadoras pequeñas, que se utilizan en un laboratorio y no tienen como fin la reproducción masiva. Una incubadora industrial tiene capacidad para miles de huevos; son del tamaño de una habitación, la calefacción se lleva a cabo por medio de aire acondicionado. El estudio, sin embargo, se centra en las incubadoras como las descritas anteriormente, que se emplean con fines de investigación.

Como se pudo notar ninguna de ellas incluye un control avanzado y se usa la electrónica con fines de instrumentación y/o para aplicar un control ON-OFF que sustituya a un termostato de oblea.

Es interesante notar que la incubadora de manufactura mexicana es muy similar a las que ya existen sin incorporar más novedad que un humidificador; incluso el diseño del gabinete y sistema de volteo es el mismo.

Las incubadoras de GQF son de manufactura extranjera y no se comercializan en México. La principal ventaja de ellas es el costo que oscila entre los \$99 USD para una incubadora Hova-Bator y \$660 USD para una tipo Digital Sportsman. Los accesorios necesarios (sistema de volteo y charolas) varían entre los \$40 y \$60 USD aproximadamente [1]. Más el costo de transporte y tiempo de entrega.



Figura 2.6: Incubadora GQF Sportsman

Algunas de las desventajas que se observan en ellas es que no incorporan controles sofisticados y la humedad se mide por medio de bulbo seco y bulbo húmedo. Se ha observado que en la Facultad de Veterinaria se utilizan termómetros de mercurio con el bulbo humedecido para determinar la temperatura de bulbo húmedo, pero ésto requiere abrir la incubadora ocasionando la pérdida del medio ambiente en el interior del incubador. La humedad en general se controla con un espejo de agua y manualmente se debe controlar agregando o quitando agua. Empíricamente se puede determinar el volumen del mismo para lograr un 55% de RH a 37.5 [° C], pero en general es complejo.

Capítulo 3

Diseño de la incubadora y de circuitos

3.1. Sistema mecánico

El sistema mecánico de la incubadora está compuesto por el gabinete y por los sistemas de humedad, ventilación y, volteo.

Gabinete.- La incubadora consiste en una caja de aglomerado de madera de 1.2 [cm] cubierto de melamina blanca cuyas medidas son 79 [cm] x 42.5 [cm] x 18 [cm]. Forrado en el interior con unicel para mantener el calor. Se escogió el alomerado con melamina por las siguientes razones:

1. Su costo: Es de aproximadamente \$127.00 por [m^2].
2. Su facilidad para limpiarse: Al nacer los pollos se crea un ambiente séptico que debe limpiarse antes de la siguiente incubación. La limpieza generalmente se lleva a cabo con cloro, por lo que el material utilizado debe ser resistente a éste y no presentar muchos poros para evitar la acumulación de gérmenes. La melamina cumple con estas características.
3. Su resistencia: Es un material rígido y duradero lo que presenta una ventaja frente a las incubadoras de unicel que son más frágiles.

La incubadora está pensada para albergar hasta 60 huevos de gallina que se distribuyen horizontalmente en un solo nivel. Esto hace que la incubadora no sea muy alta, pensando en que permite mantener y distribuir mejor el ambiente deseado de incubación.

La tapa es una pieza separada y se prefirió no utilizar bisagras debido a que si ocurriera un mal manejo de la tapa podría romperse, por lo que se sella con 3 sujetadores magnéticos al resto de la incubadora; también se colocó una esponja para ventanas entre la tapa y las paredes con el fin de garantizar un buen sellado. Al centro de la misma se cortó una ventana a la cual se le colocó una lámina de acrílico de 24 [cm] x 27 [cm] para ver el interior de la incubadora sin necesidad de destaparla.

En el exterior se encuentran los sistemas de ventilación, humedad y electrónico que se describirán más adelante.

En el interior se encuentra un motor responsable del movimiento de las charolas, así como los sensores de temperatura y humedad. En el apéndice A se pueden encontrar imágenes de la incubadora terminada.

Sistema de Humedad.- El transductor de humedad se instaló en la parte baja de tubo de PVC de 5 [cm] de diámetro en forma de «U» invertida sumergido en un recipiente con agua. El nivel del agua debe ser tal que si es demasiado no se forma niebla, mientras que si no es suficiente el generador

no funciona.

En la parte superior del tubo de PVC se colocó un ventilador pequeño que permite introducir la niebla a la incubadora mediante un par de mangueras que parten desde la parte media del tubo hacia la incubadora.

En la Figura 3.1 se muestra el sistema de humedad completo.

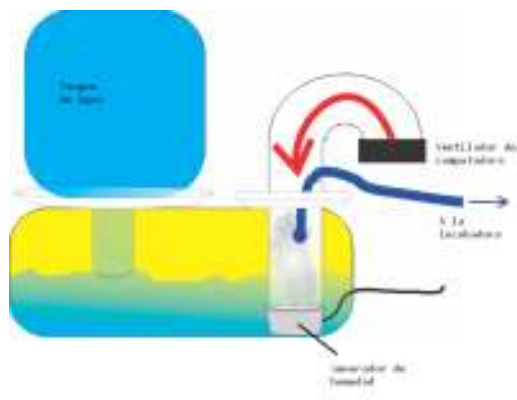


Figura 3.1: Esquema del Sistema de humedad

Sistema de Ventilación.- Como se mencionó en la sección 2.2, el sistema de ventilación cumple varias funciones y para ello se propone un sistema que consiste en un motor de secadora de cabello, una tubería de PVC y dos adaptadores planos para secadora de cabello.

El esquema del sistema en cuestión se muestra en la Figura 3.2. En tanto que el sistema completo puede encontrarse en la Figura A.5 del apéndice A.

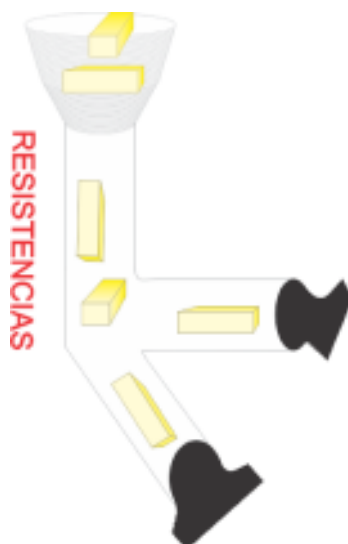


Figura 3.2: Esquema del Sistema de Ventilación

El motor es de corriente directa y cuenta a la entrada con un puente rectificador de diodos de

manera que se puede alimentar con corriente alterna. El voltaje máximo que soporta es de 30 [V] y funciona a 18 000 [RPM] con este voltaje.

El motor se colocó fuera de la incubadora y en la parte superior de la tubería.

La entrada de aire es por la parte inferior de la incubadora por medio de dos ranuras en las cuales entran los adaptadores de secadora de cabello.

Los adaptadores tienen la doble función de incrementar la velocidad de aire a su entrada a la incubadora y distribuirlo de manera *plana* a su entrada, de manera que el aire pasa por debajo de la primera hilera de huevos, choca con la pared opuesta de la incubadora y sube por el efecto de aire caliente y choque. Esto hace que la distribución de aire y la temperatura sean uniformes.

En el interior de la tubería se colocaron 6 resistencias de potencia (180 [Ω] @ 25 [W]) para calentar el aire antes de que entre en la incubadora.

Por otra parte se incluyó una tubería que va de la incubadora a la tubería principal ayudada por un motor pequeño de computadora, introduce el aire de la incubadora de vuelta a la tubería para que se caliente nuevamente. Se hizo esto con el fin de mejorar la circulación del aire en el interior de la incubadora y contribuir al calentamiento de la misma.

Sistema de Volteo.- Para cumplir los requisitos establecidos en la sección 2.2 se construyó el sistema de volteo utilizando 6 charolas de panel de aluminio (aluminio-neopreno-aluminio) que es un material utilizado en la industria de la construcción. Se eligió por ser ligero, no se deforma fácilmente y no se oxida. Tienen capacidad para 10 huevos acomodados en 2 hileras de 5 huevos cada una.

La estructura que las soporta es también de aluminio (varilla cuadrada de 0.635 [cm] y soleras de 1.1 [cm] y 1.6 [cm] de ancho y 0.1 [cm] de grosor)

Los ejes están unidos a engranes que a su vez están unidos a una barra transmisora, de manera que todas las charolas se mueven al mismo tiempo mediante un motor a pasos.

La figura 3.3 muestra el sistema completo.



Figura 3.3: Sistema de Volteo

3.2. Sensores y Actuadores

3.2.1. Sensores

Sensor de temperatura.- En una incubadora comercial los elementos utilizados para conocer la medida de temperatura en su interior son en su mayoría termostatos -que obviamente son de

tipo mecánico-; seguidos por los termistores y en menor medida, termopares; sin embargo, éstos dispositivos requieren del acondicionamiento de la señal, mientras que el sensor LM35¹ ya se encuentra calibrado [13] y no requiere tanta circuitería -únicamente un amplificador con ganancia 10 es suficiente-. Además cubre perfectamente el rango de operación de la incubadora y puede ser considerado de comportamiento lineal en toda la escala de temperatura manejada, razones por las cuales se eligió a éste sensor aunadas a su bajo costo.

Sensor de Humedad.- El sensor de humedad empleado es el HMZ-433A1. Éste sensor está integrado en un módulo que cuenta también con un termistor que funciona como sensor de temperatura que no será utilizado. Las especificaciones se muestran en el apéndice B.

Es importante notar que, de acuerdo al fabricante, la lectura del sensor depende de la temperatura a la que se tome. La Figura 3.4 es un extracto de la hoja de datos del módulo [3] y muestra los valores de voltaje a la temperatura de operación.

	10 ^o	15 ^o	20 ^o	25 ^o	30 ^o	35 ^o	40 ^o
20%RH	0.75	0.72	0.69	0.66	0.62	0.59	0.55
30%RH	1.03	1	1	0.99	0.96	0.93	0.9
40%RH	1.32	1.3	1.31	1.32	1.3	1.28	1.25
50%RH	1.64	1.63	1.64	1.65	1.64	1.63	1.61
60%RH	1.97	1.97	1.98	1.98	1.98	1.98	1.96
70%RH	2.3	2.3	2.31	2.31	2.31	2.31	2.3
80%RH	2.64	2.64	2.63	2.64	2.63	2.63	2.61
90%RH	2.97	2.96	2.94	2.97	2.94	2.92	2.9

Figura 3.4: Voltaje de salida vs. Temperatura del modulo de humedad HMZ

Debido a que se manejarán diferentes temperaturas (sobretudo en el transitorio) se optó por hacer un ajuste del sensor. Para ello se vaciaron los datos de la tabla en una gráfica («Serie 1» Figura 3.5). Posteriormente se obtuvo la recta de mejor ajuste para los puntos graficados así como la ecuación de la misma (ambas mostradas en la misma figura).

$$RH = 30.294V + 0.4216 \quad (3.1)$$

Donde RH es el porcentaje de humedad relativa y V es el voltaje marcado por el sensor. Ésta ecuación es independiente de la temperatura a la que se toma la lectura. El error resultante de este ajuste es menor al 1% (aproximadamente 0.6% de error) respecto al punto de operación.

El ajuste evita tener que cambiar de ecuación para cada temperatura que se tenga. Además el método sería inexacto para temperaturas intermedias (p.e. ¿qué ecuación debería utilizarse para una temperatura de 37 [°C]?, ¿acaso la curva perteneciente a 35 [°C] o a 40 [°C]?). El ajuste elimina este problema con un error muy bajo y facilita la programación.

¹Las hojas de datos de este sensor se muestran en el apéndice B.

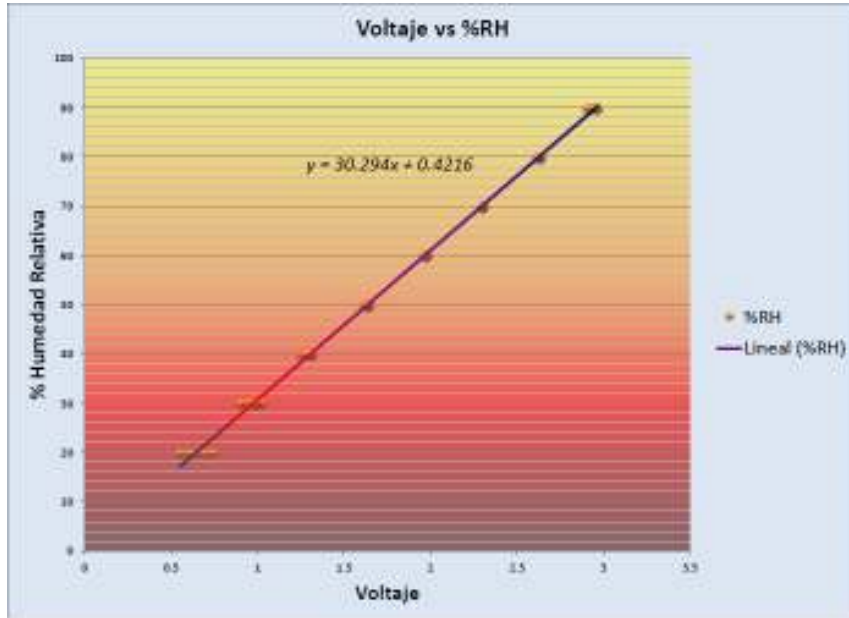


Figura 3.5: Ajuste de la lectura del sensor de humedad

3.2.2. Actuadores

Motor a Pasos.- Es el responsable del movimiento de los huevos. Es un motor de tipo unipolar que gira 1.8° por cada paso. Se eligió un motor a pasos porque se sabe que los huevos siempre girarán 45°, por lo tanto basta con contar 25 pasos para lograr ese ángulo.

La secuencia de excitación así como un diagrama esquemático del motor se muestra en la Figura 3.6.

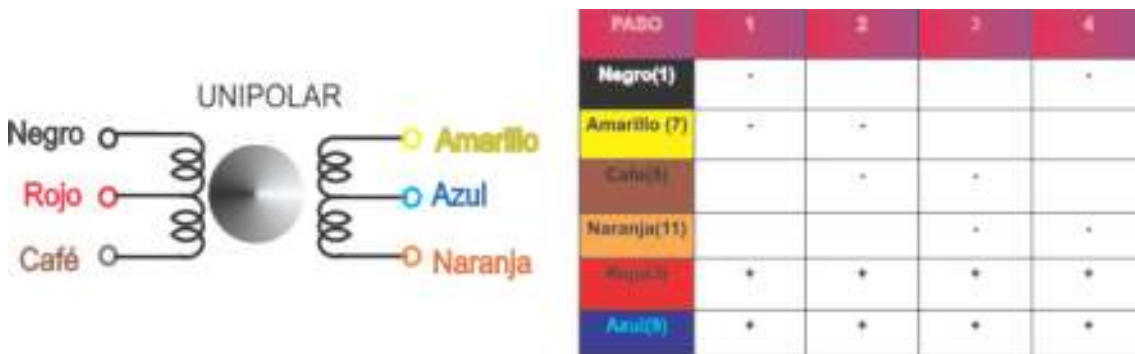


Figura 3.6: Secuencia de excitación

Esta secuencia debe realizarse una vez cada hora durante 18 días; ese tiempo estará marcado por el programa en LabView. El microcontrolador al recibir la instrucción, realiza la secuencia de giro que se obtiene de la Figura 3.6 y que se resume en la tabla 3.1.

La tabla 3.1 se recorre utilizando el registro de índice X del microcontrolador que apunta a la primera dirección de la tabla y se irá incrementando (o decrementando según el sentido de giro) hasta

Dirección de memoria	Dato (BIN)	HEX
\$0081	0000 0011	\$0F
\$0082	0000 0110	\$06
\$0083	0000 1100	\$0C
\$0084	0000 1001	\$09

Tabla 3.1: Datos para el giro del motor

la última dirección de la tabla. Al llegar a esta situación se retoma el valor de la primera dirección para reiniciar la secuencia. Se utilizó el bit 7 de la dirección \$0080 como bit bandera, que indica la dirección de giro, de manera que si éste se encuentra en 0 el motor girará hacia la izquierda, de lo contrario lo hará a la derecha.

Cada vez que el índice avanza una posición, se incrementa un contador que se comparará con el número de pasos necesarios para suspender la secuencia y llegar al ángulo deseado.

Sobra decir que cada vez que se realiza un paso, el dato se coloca en el puerto A del microcontrolador para que se pueda realizar el giro.

Generador de Humedad y Calor.- Para proporcionar la humedad que requieren los huevos se utilizó un generador de humedad FQ-40 fabricado por PUMPS FQ SA de CV, que funciona con 24 [VAC] y consume cerca de 1.2 [A] según las especificaciones del fabricante. Cuenta con un sensor de nivel integrado, de manera que si el nivel del agua es menor al especificado el dispositivo no funciona.

Las resistencias son las encargadas de elevar la temperatura en el interior de la incubadora y se encuentran en el interior de la tubería.

Tanto el generador de humedad como las resistencias funcionan con corriente alterna, por lo que para su control se utilizaron circuitos dedicados a controlar la potencia que se suministrará a la carga. A este tipo de circuitos se les conoce comúnmente como *dimmers* y se utilizaron dos: uno para las resistencias y uno para el generador de humedad. El circuito se explica en la sección 3.3. El programa en LabView determina el valor de humedad y temperatura que se requiere; manda vía puerto serie este valor al microcontrolador el cual, utilizando el puerto A, envía la información a un convertidor digital analógico quien, en conjunto con otros circuitos, determina el momento de disparo de los TRIAC.

3.3. Circuitos Electrónicos

Antes de explicar qué circuitos se utilizaron es necesario comprender de manera general cuál es la lógica de funcionamiento de la incubadora. La Figura 3.7 muestra un diagrama de bloques general de la incubadora que se enfoca en el procesamiento de la señal desde el sensor hasta que se ejecuta la acción de control mediante el ajuste de la potencia enviada a las resistencias y al generador de humedad.

A continuación se explica brevemente el funcionamiento de la incubadora representada, como se mencionó en la Figura 3.7: En primer lugar, las lecturas tomadas de los sensores de temperatura y humedad son acondicionadas² para enviarlas al microcontrolador (MCU). Las señales hasta este punto son de naturaleza analógica y después del acondicionamiento tienen un nivel entre 0 y 5 [V] en el caso de la temperatura y de 0 a 3.3 [V] para la humedad.

Son tomadas por el MCU utilizando el módulo del convertidor analógico-digital integrado y enviadas vía puerto serie a la computadora (PC) para ser procesadas, posteriormente la información se regresa de la PC al MCU vía puerto serie y la información que en este momento es de naturaleza

²Por las características del módulo del sensor de humedad no es necesario acondicionar la señal. Para el sensor de temperatura se utilizó un *promediador* de temperatura como se explicará posteriormente.

digital se envía a un convertidor digital-analógico (DAC por sus siglas en inglés). El valor de voltaje obtenido en este punto será el que determine el disparo.

Por otra parte y al tiempo que se realiza el procedimiento descrito arriba, un circuito detector de cruce por cero *convierte* la señal senoidal de la línea de 127 [VAC] (reducida mediante un transformador a 12 [VAC]) en una señal cuadrada sincronizada con la señal senoidal. Ésta señal se *integra* para obtener una señal triangular (diente de sierra) que se comparará con la salida del DAC.

Cuando se produzca el disparo de la comparación entre la señal triangular y la salida del DAC, se activa el TRIAC transfiriendo así la potencia necesaria a la carga correspondiente (resistencias o generador de humedad).

En base a lo dicho hasta aquí los circuitos necesarios para realizar las tareas necesarias son:

- Fuente de alimentación.
- Circuito promediador de temperatura.
- Circuito del microcontrolador.
- Circuito de alarma.
- Circuito detector de cruce por cero.
- *Driver* del motor a pasos.
- Etapa de potencia para el control de las resistencias y humedad.

Y a continuación se describen cada uno de los mencionados anteriormente:

Fuente de Alimentación.- La circuitería de la incubadora utiliza corriente directa y los voltajes varían entre ± 5 , $+9$ [VDC] y $+12$ [VDC], y una corriente de aproximadamente 1.5 [A].

Para cumplir estos requisitos se utilizó un transformador de 24 [V] @ 2 [A] con derivación central. Un puente rectificador de 2 [A] y un par de capacitores de 4700 [μ F] que sirven como filtros: uno para el voltaje positivo y otro para el negativo. Finalmente se utilizaron reguladores de voltaje 7805 ($+5$ [VDC]), 7809 ($+9$ [VDC] el cual está en configuración de alta corriente), 7812 ($+12$ [VDC]) y 7905 (-5 [VDC]). A la salida de los reguladores se conectaron capacitores de 470 [μ F] para evitar los rizados y estabilizar el voltaje.

El diagrama eléctrico de esta fuente se muestra en la Figura 3.8.

Promediador de Temperatura.- Para sensar la temperatura en el interior de la incubadora se utilizaron 6 sensores de precisión LM35 conectados en su configuración básica como lo muestra la Figura 3.9.

Dadas las características de este sensor -descritas en la sección 3.2- se optó por utilizar uno para conocer la temperatura ambiente y uno más para la temperatura de aire a la entrada, mientras que se utilizaron 4 para determinar la temperatura en el interior de la incubadora. Las lecturas de éstos 4 sensores se promediaron; para llevar a cabo esto se diseñó un *circuito promediador* basado en amplificadores operacionales en configuración sumador inversor y amplificador inversor.

La primera etapa -sumador inversor- suma las lecturas de los sensores y tiene ganancia variable, que permite el ajuste del circuito.

La segunda etapa es un amplificador inversor con ganancia 10. Ésta segunda etapa sirve también para tener un voltaje siempre positivo, pues en la primera el voltaje de salida es negativo.

Al polarizar el circuito con ± 5 VDC se garantiza que el voltaje de salida nunca excederá este valor y por lo tanto no dañará al microcontrolador que en los puertos del convertidor analógico digital maneja un rango de 0 a 5 [VDC]. Un voltaje mayor podría dañar permanentemente el puerto.

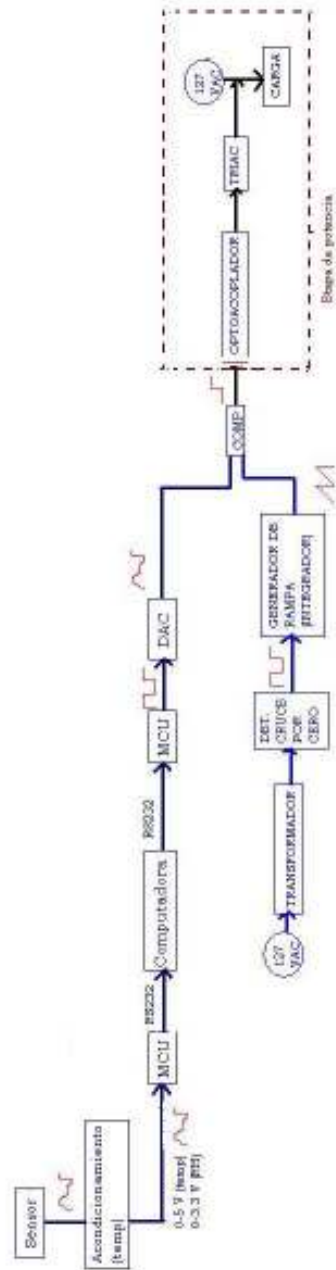


Figura 3.7: Diagrama de bloques de la incubadora

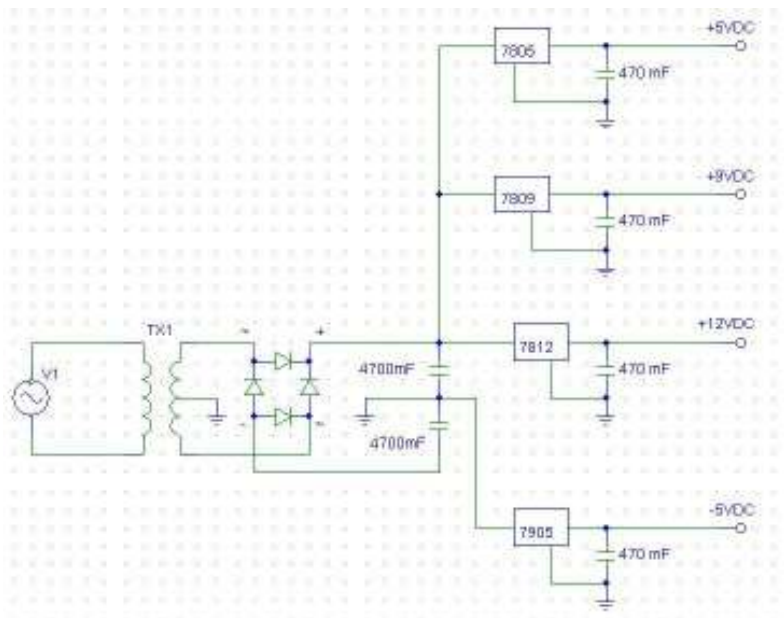


Figura 3.8: Fuente de Alimentación

Se utilizó un amplificador operacional TL082 que contiene dos amplificadores operacionales. Se eligió este chip porque cumple con las características suficientes para la aplicación mencionada (ver referencia [14]). El diagrama del circuito se muestra en la Figura 3.10

Circuito del microcontrolador.- El MCU utilizado es el MC68HC908GP32 que sirve de interface entre la computadora y la incubadora. El circuito fue diseñado por el Mtro. Antonio Salvá Calleja de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Para mayor información se puede consultar [7], mientras que una imagen del circuito puede verse en el apéndiceA, Figura A.7.

Circuito de Alarma.- Este circuito consiste en dos transistores 2N2222 que son utilizados en corte y saturación. Uno de los amplificadores activa o desactiva un circuito astable, lo que la señal en la base del transistor es la señal de alarma. Una vez que encienda, el amplificador se satura y el astable se activa. La señal de la salida astable, a una frecuencia de 120 [Hz], es mandado a un LED y a su vez al otro transistor para generar una corriente suficiente para encender la bocina que se encuentra conectada en el emisor del transistor en paralelo con un diodo 1N4007 cuyo objetivo es proteger al transistor de las corrientes transitorias debidas a la bobina de la bocina. El sistema astable está constituido por un circuito integrado LM555 que genera ondas cuadradas a una cierta frecuencia. La frecuencia deseada se obtiene mediante la configuración mencionada en la hoja de especificaciones del mismo. El diagrama del circuito de alarma se muestra en la Figura 3.11.

Circuito detector de cruce por cero.- Este circuito consiste en un divisor de voltaje y un comparador LM311 con su configuración de detector de cruce por cero. El divisor de voltaje consiste en dos resistencias (10 [kΩ] y 1 [kΩ]) que provoca que la señal de entrada (la del transformador) disminuya su voltaje. Esta señal disminuida entra en la terminal positiva del comparador mientras que la terminal negativa está conectada a tierra. La salida del comparador es una señal de onda

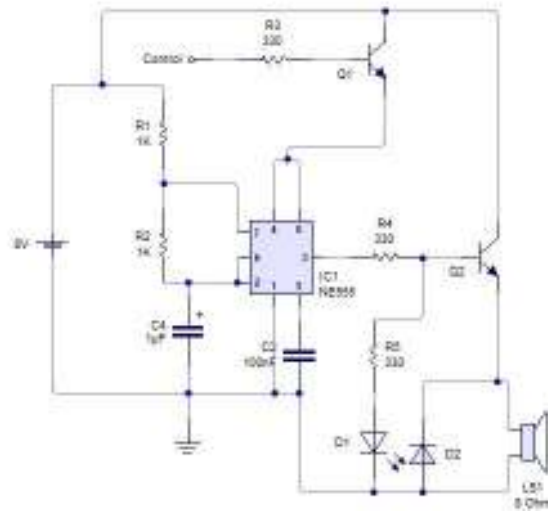


Figura 3.11: Circuito del sistema de alarma

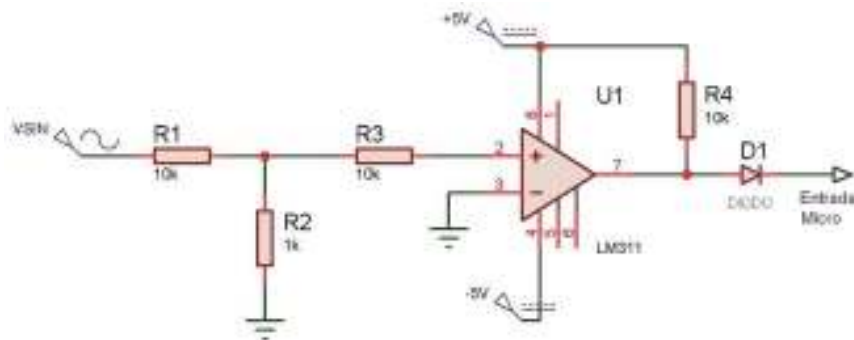


Figura 3.12: Circuito Detector de Cruce por Cero

(DAC) para obtener el punto de disparo. En la Figura 3.15 se puede observar como ésta señal está perfectamente sincronizada con la senoidal y cómo funciona junto con el DAC para obtener el punto de disparo.

Convertidor Digital-Analógico (DAC).- El DAC consiste en un amplificador (en tal caso se utilizó el circuito integrado TL084 porque contiene 4 amplificadores operacionales) sumador inversor que tiene un arreglo de resistencias como se muestra en la figura 3.14.

El voltaje de salida se puede obtener mediante la expresión:

$$V_0 = -R_f \left(\frac{V_0}{2R_f} + \frac{V_1}{4R_f} + \frac{V_2}{8R_f} + \frac{V_3}{16R_f} \right)$$

Para el caso de la incubadora el valor de R_f que se encuentra en el numerador es modificada para obtener un voltaje que muestre todo el rango del amplificador operacional mientras éste no se sature y para realizar una comparación adecuada entre el generador rampa y el mismo DAC. Por lo tanto el voltaje de salida esta dado por la expresión:

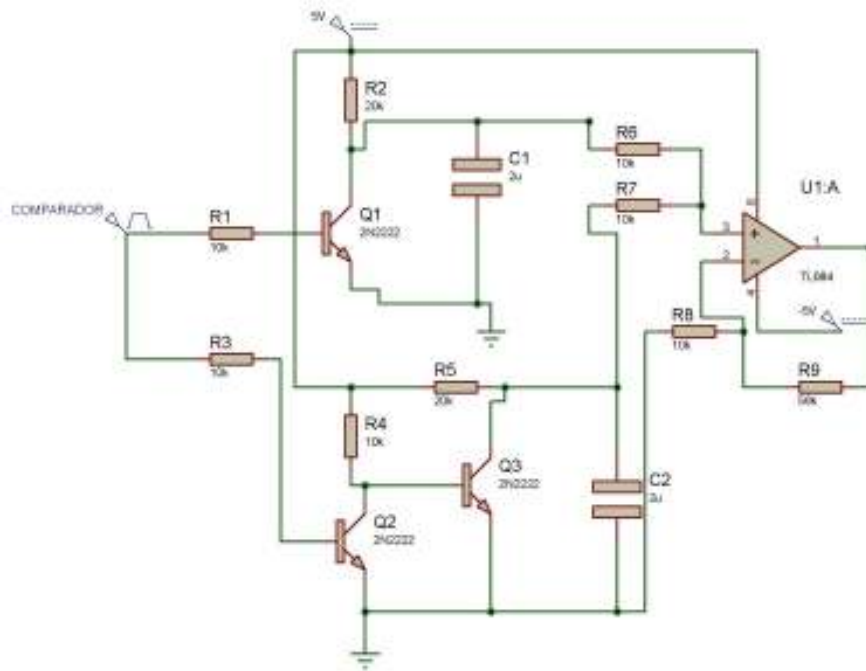


Figura 3.13: Generador rampa a una frecuencia de 120Hz

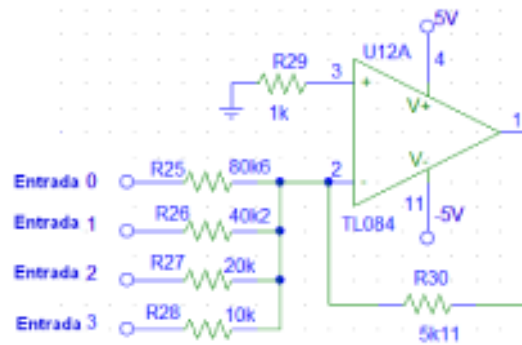


Figura 3.14: DAC de 4 bits con un amplificador TL084

$$V_0 = -R_i \left(\frac{V_0}{2R_f} + \frac{V_1}{4R_f} + \frac{V_2}{8R_f} + \frac{V_3}{16R_f} \right)$$

Los valores del denominador siguen conservándose, mientras que el valor de R_i puede modificarse para obtener mayor ganancia. El DAC utilizado es de 4 bits y el voltaje de salida que puede enviar es de la misma amplitud de la rampa. Esto significa que cuando se tenga «1111» en las entradas del DAC, el voltaje a la salida será el voltaje máximo al que puede llegar la rampa, de esta manera se «barre» toda la rampa cubriendo al mismo tiempo toda la señal senoidal.

La salida del DAC se compara con la rampa para obtener el punto de disparo del TRIAC y enviar la potencia necesaria a la carga. (ver Figura 3.15).

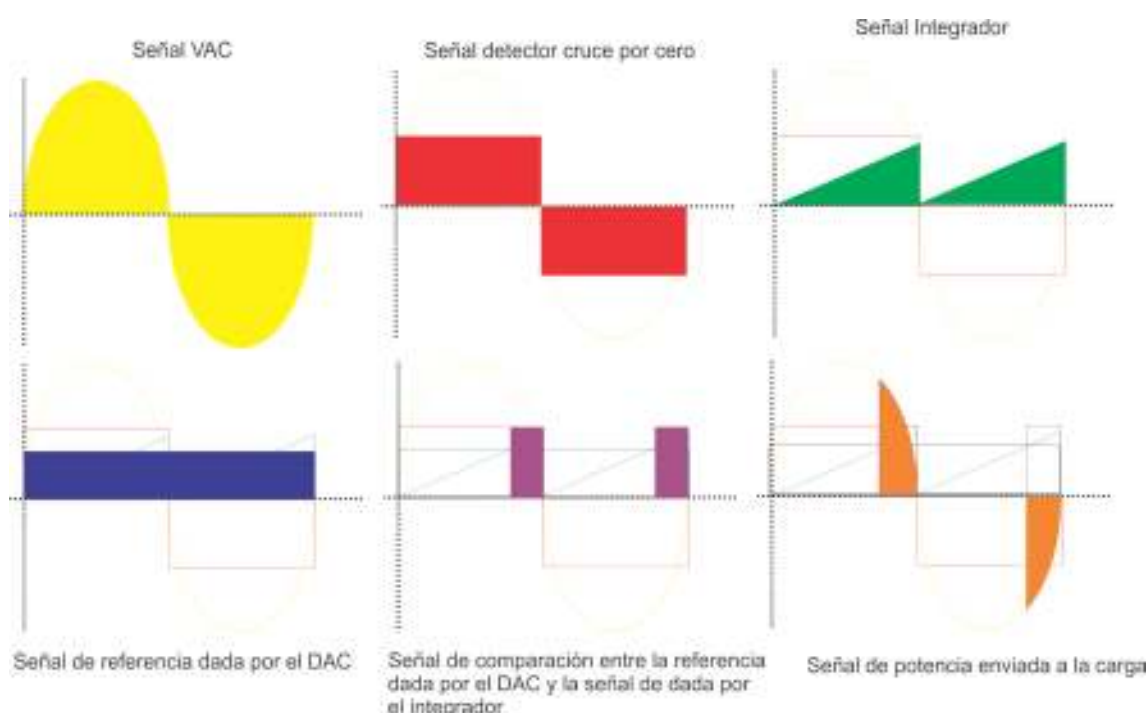


Figura 3.15: Señales involucradas en el proceso de control de potencia

Etapa de potencia para el control de las resistencias y humedad.- Una vez que se tiene el punto de disparo es necesario activar el TRIAC correspondiente que sirve como *switch* para enviar la potencia necesaria a la carga. Para ello se utilizó un optoacoplador (MOC3011) que sirve para aislar la circuitería de control (de bajo voltaje) de la carga (voltaje mayor). Éste optoacoplador recibe el pulso (salida del comparador) y activa al TRIAC, que permanecerá encendido desde este momento y hasta que la senoidal de 127 [VAC] cruce por cero. Un nuevo pulso volverá a activar el TRIAC, enviando así la potencia a la carga. La Figura 3.15 muestra las señales involucradas en el control de potencia, mientras que el diagrama de este circuito se muestra en la Figura 3.16.

Driver del motor a pasos.- Para el Driver del motor a pasos se utilizó un circuito integrado ULN2803 el cual es un arreglo de transistores Darlington que cuenta con protección interna para manejar cargas inductivas y capaz de manejar una corriente de hasta 500 [mA]. Las salidas del puerto B del microcontrolador se conectan directamente a las entradas de este chip y las salidas se conectan

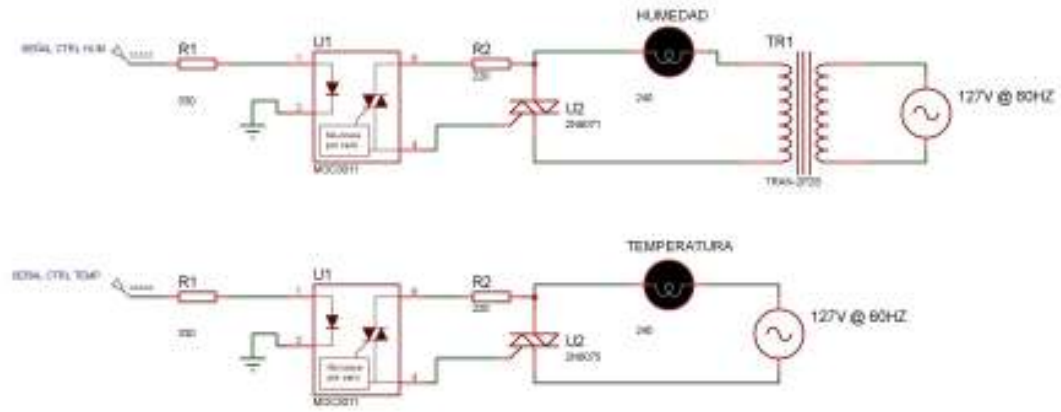


Figura 3.16: Diagrama electrónico para el control de la humedad y la temperatura

directamente al motor; tanto el circuito como el motor se polarizan con +9 [VDC]. El circuito como se puede ver en la Figura 3.17 es sumamente sencillo.

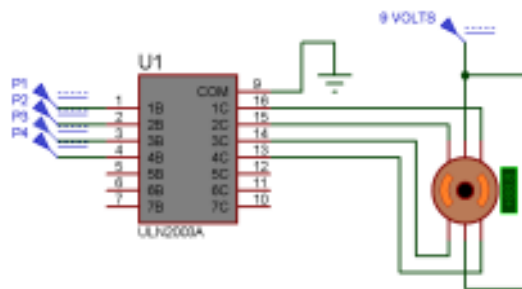


Figura 3.17: Circuito del Driver del Motor a Pasos

Capítulo 4

Interfaz de Usuario

Para que el usuario posea un mejor análisis del proceso de incubación y un mejor manejo de la información se consideró la comunicación con una computadora.

Existe una gran variedad de *software* para hacer dicha comunicación amigable con el usuario, pero por su fácil manejo tanto para el programador como para el usuario se consideró LabView de National Instruments (NI) como la mejor opción.

4.1. LabView

Una de las ventajas de utilizar Labview es que es un lenguaje de programación gráfico muy intuitivo para el desarrollador, además de que posee una visualización muy atractiva para analizar los procesos mediante gráficas de temperatura y humedad; por otra parte, permite guardar archivos con información sobre el control de temperatura-humedad entre otros.

National Instruments define a Labview como

[...]un entorno de programación gráfica [...] para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. Ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual.¹

4.1.1. Configuración del Puerto Serie

La comunicación entre la computadora y la incubadora se lleva a cabo mediante el puerto serie utilizando el estándar RS-232 y se configura a 9600 [bps] 8N1. Eso significa que se enviarán 9600 bits por segundo en el formato 8N1: 8 bits de datos sin paridad y un bit de parada.

La configuración del puerto en LabView es sumamente sencilla utilizando el VI² *VISA Configure Serial Port* el cual inicializa el puerto serie de acuerdo a lo mencionado anteriormente. La Figura 4.1 muestra a detalle el mencionado bloque.

La configuración del puerto queda definida en la tabla 4.1:

Sin embargo, la configuración del microcontrolador es un poco más complicada. Para conseguir la comunicación serial es necesario hacer uso del módulo para comunicación serial *Serial Communications Interface Module (SCI)* que se encarga de manejar toda la comunicación al mismo tiempo que el

¹<http://www.ni.com/labview/whatis/>

²Un VI (*Virtual Instrument*) es un subprograma de LabView. Los programas que se desarrollan con este lenguaje son considerados VI's, razón por la cual la extensión de éstos programas es *.vi

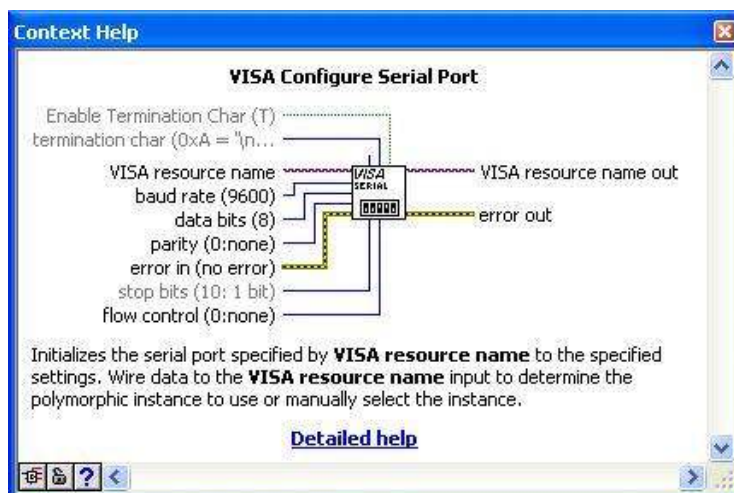


Figura 4.1: Vista de la ayuda contextual de LabView correspondiente al VI *VISA Configure Serial Port*

VISA Resource Name	COM1
baud rate	9600
data bits	8
parity	none
error in	no error
stop bits	1 bit
flow control	none
Enable Termination Char	False (F)
Termination char	<i>default</i>

Tabla 4.1: Parámetros de configuración del puerto serie en el VI mencionado en la fig 4.1

microcontrolador ejecuta otras instrucciones; esto es, se podría enviar o recibir un caracter sin tener dedicado el CPU a dicho proceso.

Los registros necesarios para utilizar el SCI son:

- 2 registros de configuración del módulo (SCC1 y SCC2).
- 1 registros de estado (SCS1)
- 1 registro de datos (SCDR)
- 1 registro de selección de baudaje (SCBR)

Adicionalmente se utilizó el registro de configuración CONFIG2 para utilizar al oscilador externo de 8 [MHz] como reloj del módulo SCI [15]. Para esto bastó con escribir un cero (0) al bit 0 de dicho registro ubicado en la localidad \$001E. A continuación se hace una descripción de los registros mencionados anteriormente.

Registro de configuración (SCC1).- Este registro ubicado en la localidad \$0013 maneja los siguientes bits de acuerdo a la hoja de datos del fabricante (Fig. 4.2 [15]):

Dirección: \$0013

	Bit 7	6	5	4	3	2	1	Bit 0
Leer:	LOOPS	ENSCI	TXINV	M	WAKE	ILTY	PEN	PTY
Escribir:								
Reinicio:	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.2: Registro de configuración SCC1

- **LOOPS:** Este bit habilita un modo de operación en el que la salida del receptor se conecta a la entrada del transmisor. Como no se utilizará su valor será 0 (cero).
- **ENSCI:** Habilita el SCI. Su valor deberá ser 1 (uno).
- **TXINV:** Invierte la polaridad de los datos transmitidos. Se mantiene en 0.
- **M:** Determina si el dato a transmitir es de 8 o 9 bits. Para este caso se requieren 8 bits unicamente por lo que el valor de este bit será cero.
- **WAKE:** Si está activado determina que valor *despierta* al SCI; sin embargo, no se utilizará y deberá permanecer en 0 al igual que el bit ILTY. Estos 2 bits se utilizan para desocupar sin desactivar al SCI en caso de que se utilicen varios dispositivos.
- **PEN y PTY:** Estos bits determinan el tipo de paridad: PAR, IMPAR o mula. Un valor de 0 en PEN y *don't care* en PTY -como la configuración empleada- determina que no se utilizará paridad.

Registro de configuración SCC2.- Habilita o deshabilita las interrupciones manejadas por el SCI así como al transmisor, receptor y modo de espera. La Figura 4.3 muestra este registro [15]. Los 4 bits altos corresponden a las interrupciones por transmisión, transmisión completa, por recepción y, por línea desocupada. La aplicación en cuestión no requiere de ninguna de estas interrupciones, por lo que el valor de estos bits será cero.

Los bits 3 y 2 (TE y RE respectivamente) habilitan el transmisor (TE) y el receptor (RE). Ambos deberán tener el valor de 1. Los dos últimos bits -cuyo valor es cero- son de modo en espera (RWU) y para enviar un caracter de terminación (SBK).

Es importante mencionar que primero se debe escribir en el SCC1 y posteriormente en el SCC2. Esto debido a los requerimientos mencionados en la referencia [15].

Dirección: \$0014

	Bit 7	6	5	4	3	2	1	Bit 0
Leer:	SCTIE	TCIE	SCRIE	ILIE	TE	RE	RWU	SBK
Escribir:								
Reinicio:	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.3: Registro de configuración (SCC2)

Registro de selección de baudaje (SCBR).- Previamente se mencionó que serán transmitidos 9600 bits por segundo ([bps] o [baud]). Para lograr esta tasa de transmisión se hace uso de este registro (Figura 4.4)



Figura 4.4: Registro de selección de baudaje (SCBR)

Cuenta con 2 bits preescaladores: SCP1 y SCP0 que pueden dividir la entrada de reloj entre 1, 3, 4 y 13. Los 3 bits restantes (SCR2 al 0) son divisores de baudaje y se utilizan de acuerdo a la siguiente fórmula proporcionada por el fabricante.

$$bauds = \frac{reloj}{64 \times preescalador \times divisor} \quad (4.1)$$

Se desean 9600 [bauds] por lo que al seleccionar «preescalador» como el máximo valor que puede tomar (13) y despejando de la ecuación 4.1 con $reloj = 8$ [MHz] se tiene que el divisor es 1, por lo tanto SCP1 y SCP2 toman el valor de 1 (para seleccionar un preescalador de 13) y SCR2, SCR1 y SCR0 permanecen en 0 (para tener un divisor de 1)³. El siguiente extracto de código corresponde a la configuración del puerto para el microcontrolador utilizado. La tabla 4.2 muestra el valor de los registros en formato binario.

```

cfgserie: lda #$30
          sta SCBR
          bset 6,SCC1
          mov #$0C,SCC2
  
```

Registro	7	6	5	4	3	2	1	0
SCBR	0	0	1	1	0	0	0	0
SCC1	0	1	0	0	0	0	0	0
SCC2	0	0	0	0	1	1	0	0

Tabla 4.2: Valor de los registros para la configuración del puerto serie

Los siguientes registros no forman parte de la configuración del puerto serie pero forman una parte crucial para el funcionamiento del mismo:

Registro de datos (SCDR).- Es una localidad de almacenamiento temporal que contiene al carácter que será enviado o el que se acaba de recibir.

Registro de estado (SCS1).- Este registro contiene banderas que indican cuando ha ocurrido algún evento. La descripción completa puede encontrarse en [15]; sin embargo, solo se utilizarán los bits 7 y 5 marcados en la Figura 4.5.

³Una tabla con los valores del divisor y preescalador pueden encontrarse en [15]



Figura 4.5: Registro de estados SCS1

El bit SCTE indica cuando un caracter pasa del registro de datos al de corrimiento para su transmisión, mientras que el bit 5 (SCRF) indica lo mismo pero para recepción.

A continuación se muestra el código en lenguaje ensamblador de las subrutinas de envío (*poncar*) y recepción (*leecar*) de un caracter. En ambas rutinas se muestra el uso de SCS1. La localidad \$A9 sirve para almacenar el caracter leído o que será transmitido. Nótese que ambas rutinas tienen un funcionamiento similar: limpian la bandera en cuestión, toman (o escriben) el valor de localidad \$A9 al SCDR y esperan a que finalice la transmisión o recepción monitoreando el estado del bit testigo.

```
poncar: lda SCS1
        MOV $a9,SCDR
chescte: brclr 7,SCS1,chescte
        rts
```

```
leecar: brclr 5,SCS1,leecar
        lda SCS1
        lda SCDR
        sta $A9
        rts
```

4.1.2. Programación del Panel Frontal (Panel de supervisión)

El Panel Frontal que se muestra en la Figura 4.6 sirve para que el usuario pueda interactuar con la incubadora. Se pensó para que su uso fuera sumamente sencillo al incluir pocos controles.

Desde aquí se puede monitorear la temperatura y la humedad en el interior de la incubadora por medio de gráficas e indicadores (Figura 4.7). También se puede decidir si las referencias serán tomadas desde un archivo o se definirán manualmente utilizando las perillas (Figura 4.8)

El panel de supervisión también permite decidir si los datos de la adquisición se guardarán en un archivo que el usuario designa, cuánto tiempo lleva trabajando la máquina así como fecha y hora de inicio.

Para fines de esta tesis se incluyó un menú para elegir el tipo de controlador que se aplicará. Contiene también 3 indicadores para saber el estado de la comunicación con la incubadora. Éstos se muestran en la Figura 4.9.

Es importante decir que cuando se realiza la rutina del motor el indicador de FALLA puede encenderse; esto debido a que durante la rutina del motor no se envían ni reciben datos.

Cuando se inicia el programa aparece una ventana solicitando la ubicación del archivo donde se guardarán los datos. Es importante mencionar que aún cuando no se vaya a utilizar esta opción es necesario seleccionar un archivo. Si éste no existe, se creará.



Figura 4.6: Panel Frontal

Posteriormente es necesario iniciar la comunicación entre la computadora (PC) y la incubadora. La Figura 4.10 muestra un extracto del panel frontal que muestra la secuencia para iniciar la comunicación.

Si el paso 1 de la Figura 4.10 falla el indicador no se deshabilita y es necesario verificar que el cable serial esté conectado, que el microcontrolador esté encendido y que el led verde de la placa del mismo no parpadee rápidamente. Presionar el botón de reset de la placa del microcontrolador puede ayudar a resolver el problema.

4.2. Creación de Subrutinas

El programa de interfaz utiliza básicamente 5 subrutinas:

1. Comunicación serial.
2. Contador de tiempo.
3. Lectura de archivo de referencias.
4. Convertidor a caracter.
5. Control.

En primer lugar se tiene la subrutina (SubVI en LabView) de comunicación serial, la cual es una pieza fundamental del programa pues es la que se encarga de la interacción con el microcontrolador y por tanto, con la incubadora. Su función es recibir los datos de los sensores, calcula el valor del controlador y envía la información de vuelta al MCU.

Con el fin de minimizar errores se creó un *protocolo* para la comunicación cuyo funcionamiento es el siguiente: el programa de LabView envía una letra minúscula al MCU. Si la letra minúscula coincide con la secuencia el microcontrolador responde con la misma letra en versión mayúscula y enseguida

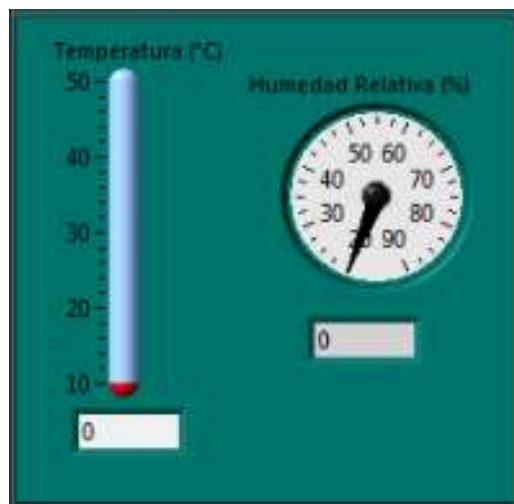


Figura 4.7: Indicadores de Temperatura (izq) y Humedad Relativa (der)

envía un caracter que corresponde al dato del sensor correspondiente. La Figura 4.11 muestra de manera gráfica lo descrito anteriormente.

Tras haber recibido los datos de los sensores, el subVI convierte los caracteres en valores numéricos para poder ser desplegados en los indicadores del panel frontal del VI principal. Después se llama al subVI que hace el cálculo del controlador. Esta operación da como resultado un caracter cuyos bits altos tienen el valor del ajuste de temperatura y los bajos corresponden a la humedad relativa. El mencionado caracter se envía al MCU para que se realice la acción de control.

La secuencia de transmisión serial finaliza justo después de que se envía caracter de control. Para indicar la terminación LabView manda una 't'.

Cabe mencionar que si al inicio de la subrutina el indicador «1 hora» tiene el valor de verdadero, se envía una 'm' en lugar de una 't'. Con esto el microcontrolador realiza el giro del motor y después continúa con la secuencia descrita arriba⁴.

La segunda subrutina (*contador de tiempo*) tiene como objetivo indicar el momento en el que ha transcurrido una hora. Su aplicación en el programa principal es para determinar el tiempo de incubación y para realizar el movimiento del motor. Cabe notar que éste SubVI sólo activa una alarma cuando ha pasado éste tiempo; el programa principal utiliza la información de este SubVI para llevar a cabo las tareas antes mencionadas. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 4.16.

Su funcionamiento se basa en obtener la hora del sistema y hacer una *base de tiempo* de 5 minutos. Para saber cuando ha transcurrido una hora sólo es necesario contar 12 intervalos de 5 minutos.

La subrutina primero obtiene el valor de los minutos de la hora del sistema; por ejemplo, si la hora es 01:18:34 se obtiene «18». Posteriormente ese valor se compara con el valor del control «minute2». Éste último contiene el valor de los minutos a los que se debe llegar para que se considere que han transcurrido 5 minutos. Utilizando el ejemplo anterior, después de la primera iteración el valor de «minute2» será $18+5=23$. Por lo tanto cuando los minutos de la hora del sistema lleguen a «23» se entrará a la estructura «case». Nótese que en la primera iteración («ind»=0), el valor de la condición para entrar al *case* se fuerza a verdadero; ésto es para evitar que la rutina incremente la cuenta cada vez que se ejecuta o para evitar el caso en que nunca se cumple la condición del *case*. La Figura 4.17 muestra este proceso.

⁴Las figuras 4.12 a la 4.15 muestran los diagramas de bloques de lo descrito arriba.

Una vez que se entra en el *case* significa que han transcurrido 5 minutos, por lo que se incrementa un contador «índ» que contará hasta 13 (recuérdese que la cuenta inicia en uno por que se forzó la primera iteración). Al llegar a éste valor se reinicia a 1 y se enciende el indicador «1 hora». También al entrar a la condición, se enciende un indicador «time to write» que indica que han transcurrido 5 minutos y si está habilitada la función se escribe al archivo. Finalmente se incrementa la referencia de minutos, cuidando de que el valor de la referencia no sea mayor o igual a 60. En la Figura 4.18 se muestra la segunda parte de la subrutina.

Si la condición para entrar al *case* no se cumple el indicador «time to write» toma el valor «falso».

La subrutina *Lectura de archivo de referencias* se muestra en la Figura 4.19. Consiste básicamente en leer los valores de un archivo de texto que tiene el formato que muestra la Tabla 4.3.

temperatura	humedad	tiempo final en horas
37.5	55.0	100
40.0	80.0	504

Tabla 4.3: Formato del Archivo de Referencias

La segunda columna de la mencionada tabla es un ejemplo de una referencia: la temperatura permanecerá en 37.5 [°C], la humedad (RH) en 55% y se deberá mantener así hasta que el tiempo de incubación sea 100 [hrs]. Posteriormente la temperatura deberá ser de 40 [°C], la RH 80% y se mantendrá de ese modo hasta las 504 horas de incubación.

La subrutina lee un renglón cada vez que es invocada y lo separa en 3 cadenas: temperatura, RH y horas para después convertir las cadenas a números.

Cabe mencionar que al inicio de la subrutina, se especifica que la posición del archivo es justo donde quedó al finalizar la ejecución anterior, es decir, sin regresar al inicio o al final del mismo. De lo contrario siempre leería el primer renglón del archivo.

La tercera subrutina convierte un valor numérico en un caracter ASCII para poder ser enviado por el puerto serie al microcontrolador. Como solo se tiene un puerto de 8 bits en el MCU es necesario dividirlo en 2 conjuntos de 4 bits cada uno: el primero para temperatura y el segundo para humedad. De este modo el resultado del controlador de cada variable se debe ajustar a un número entero no signado entre cero y 15. Además, como la transmisión serial es en base a 1 caracter (8 bits), se optó por mandar en un solo caracter el valor de temperatura (primeros 4 bits) y humedad (últimos 4 bits). La Figura 4.20 ejemplifica el funcionamiento de lo descrito anteriormente.

La conversión se llevó a cabo suponiendo que el valor máximo de temperatura o humedad que puede arrojar la señal de control es 250 y el mínimo es cero; entonces, si se divide el intervalo (250) entre el número máximo (15) se obtiene el valor del «incremento», es decir, cada incremento de 1 bit representa un incremento de 16.67 unidades en base 10.

Para convertir el valor de temperatura basta con dividirlo entre 16.67; posteriormente convertir ese número a un entero no signado de 8 bits y bajo ese formato multiplicarlo por 16 para «mover» el resultado a los 4 bits altos del caracter. El caso de la humedad es análogo al primer paso; después simplemente se suma el resultado formateado del mismo modo de la temperatura al resultado de esta. De este modo justo el resultado tiene en un solo caracter el valor a colocar en temperatura y humedad. Cabe mencionar que se colocó un limitador en caso de que el valor dado por el controlador excediese el valor 250 explicado anteriormente. Se notará también que al resultado de la operación es restado a 255, pues un valor de \$FF indica que los actuadores utilicen la máxima potencia mientras que el \$00, la mínima; pero con el control de potencia un valor de \$00 hará que dispare al inicio del lóbulo de la onda senoidal con lo que se transfiere la máxima potencia. Es por eso que al restar 255 se invierten los valores adecuándolos a su uso para dicho control.

El diagrama de bloques de ésta subrutina se puede ver en la Figura 4.21.

La programación de los controladores se hizo utilizando un SubVI específicamente para ello. Su estructura básica -a diferencia de los demás- es un *Formula Node* que permite escribir código con sintáxis tipo lenguaje C. Esta subrutina tiene como entradas la lectura de humedad y temperatura así como el valor de las referencias. La salida es un caracter que está listo para enviarse al MCU. El valor de las ganancias se debe ajustar en el mismo SubVI.

Control PID.- La estructura de un controlador PID se describe en el Capítulo 5, Sección 6 y aquí se describirá el algoritmo utilizado para llevarlo a cabo.

En primer lugar se define la señal de error como la diferencia entre el valor deseado y el valor medido de lo que se quiere controlar. Ésta señal se multiplicará (Proporcional), integrará (Integral) y derivará (Derivativo) para obtener la señal de control que producirá la salida deseada.

Para integrar la señal de error se utilizó una aproximación trapezoidal de la integral. Éste método se basa en aproximar el área bajo la curva como una suma de trapecios. La Figura 4.22 ilustra lo anterior.

De este modo, la integral

$$\int_a^b f(t)dt \approx \frac{f(b) + f(a)}{2} \cdot \Delta t$$

En este caso, $f(t)$ corresponde a la señal de error que es la diferencia entre el valor medido y el deseado; $f(a)$ es el valor de error *anterior* y $f(b)$ es el error *actual* (entiéndase «anterior» como el valor del error una iteración antes de la «actual»). Δt es el tiempo que transcurre entre una iteración y otra (en segundos).

Por último, para obtener toda la integral, se suman las áreas de los trapecios; de esta forma, la expresión que se utilizó para calcular la integral fue:

$$F_i = F_{i_1} + \frac{E_r + E_{r_1}}{2} \cdot \Delta t$$

Donde F_i es el valor de la integral *actual*, F_{i_1} es el correspondiente a la integral *anterior*; E_r es el error *actual* y de manera análoga a la integral, E_{r_1} es el error *anterior*.

Obtener la derivada es más sencillo pues corresponde a una razón de cambio y puede aproximarse como:

$$\frac{d}{dt} f(t) \approx \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = \frac{E_r - E_{r_1}}{\Delta t}$$

Control en el Espacio de Estados.- Este tipo de control se describe en la Sección 5.4 y aquí se explicará la manera de programarlo para obtener los valores deseados.

La programación de este control es sumamente sencilla puesto que la dimensión de las matrices involucradas no es grande (2×2 , 2×1 , etc.) y la expresión para la retroalimentación tampoco es complicada:

$$u = -kx - B^{-1}W$$

dado que u es un vector de 2×1

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

cada uno de sus elementos corresponde a la señal de control de cada variable involucrada. En este caso, el primer elemento u_1 es la señal para la humedad relativa y el segundo u_2 para la temperatura (ver sección 5.4). Si se definen las matrices siguientes

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$k = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}$$

$$B^{-1}W = \begin{bmatrix} -8.470 \\ -0.221 \end{bmatrix}$$

La señal de error es $e = r - x$. Es importante notar que la referencia r lleva asociada una ganancia y que la señal de error realmente es $u = kr - kx$; por lo tanto, en términos del error la señal queda como

$$u = ke - B^{-1}W \quad (4.2)$$

Al realizar el álgebra necesaria y considerando la ecuación 4.2 se llega a:

$$\begin{aligned} u_1 &= e_1 k_1 + e_2 k_2 - 8.470 \\ u_2 &= e_1 k_3 + e_2 k_4 - 0.221 \end{aligned} \quad (4.3)$$

que son fácilmente programables en un *Formula Node* que, como se dijo, maneja un lenguaje similar a C.

Cabe mencionar que, con fines de experimentación se programaron diferentes casos de control en espacio de estados:

1. Modo Regulador ($r=0$) incluyendo el término $B^{-1}W$
2. Modo Regulador ($r=0$) sin el término $B^{-1}W$
3. Modo Seguimiento ($r \neq 0$) incluyendo el término $B^{-1}W$
4. Modo Seguimiento ($r \neq 0$) sin el término $B^{-1}W$

En el caso de un control de tipo regulador, la *referencia* es el estado *anterior* a la perturbación, por lo que se incluyó un contador para que, al seleccionar cualquiera de las opciones que involucren *modo regulador*, el programa asigne el valor del estado en que se encuentra la incubadora al momento de seleccionar dicha opción a la referencia. Así, si la incubadora estaba en 33 [°C] y 30% RH al momento de seleccionar el modo regulador, la referencia quedará como 33 [°C] y 30% RH.

4.3. Planeación de Trayectorias

Se ha dicho anteriormente que los huevos deben mantenerse a temperatura constante de 37.5 [°C] y a 55% de RH los primeros 18 días de incubación; sin embargo, en la práctica éstas temperaturas se pueden cambiar ligeramente para mejorar la incubabilidad.

El Dr. Marco Antonio Juárez Estrada, de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la UNAM, ha

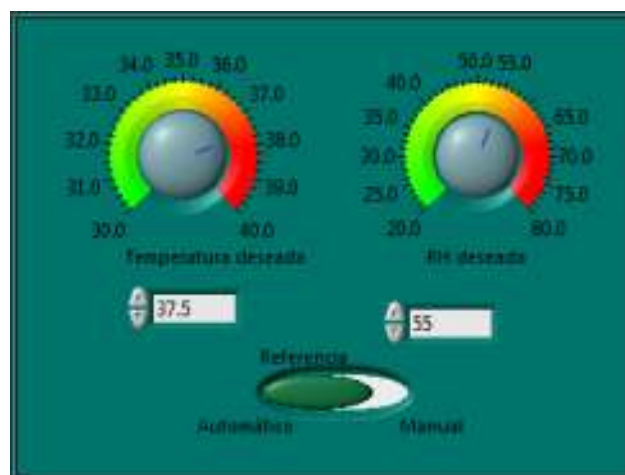


Figura 4.8: Perillas para ajuste manual de las referencias

Día	Horas	Leghorn		Ross 308	
		(°C)	(% RH)	(°C)	(% RH)
0	0	37.77	54.13	37.77	55.34
1	24	37.77	54.13	37.77	55.34
2	48	37.77	54.13	37.77	55.34
3	72	37.77	54.13	37.72	55.52
4	96	37.77	54.13	37.72	55.52
5	120	37.66	54.54	37.72	55.52
6	144	37.66	54.54	37.72	55.52
7	168	37.66	54.54	37.72	55.53
8	192	37.66	54.54	37.61	55.94
9	216	37.66	54.54	37.61	55.94
10	240	37.66	54.54	37.61	55.94
11	264	37.66	54.54	37.50	56.36
12	288	37.66	54.54	37.50	56.36
13	312	37.66	54.54	37.50	56.36
14	336	37.66	54.54	37.38	56.82
15	360	37.66	54.54	37.38	56.82
16	384	37.66	54.54	37.22	57.44
17	408	37.66	54.54	37.22	57.44
18	432	37.77	54.54	36.88	57.44
19	456	37.22	71.96	36.88	73.58
20	480	37.22	71.96	36.88	73.58
21	504	37.22	71.96	36.88	73.58

Tabla 4.4: Temperaturas de Incubación y Humedad Relativa



Figura 4.9: Indicadores del estado de la comunicación.

realizado incubaciones exitosas modificando la temperatura en diversos días. Basado en estudios previos y en su experiencia, las temperaturas y humedades para dos estirpes de aves⁵ se muestran en la Tabla 4.4.

Los valores de la tabla estaban dados en grados Fahrenheit, pero la incubadora trabaja en grados Celsius, por lo que se realizó la conversión pertinente para presentarlos aquí. De igual manera, se tenían las lecturas de bulbo húmedo, así que se utilizó una calculadora para obtener la humedad relativa a partir de la temperatura de bulbo seco, la de bulbo húmedo y la altura de la Ciudad de México (2230 [msnm]). La calculadora puede ser consultada y utilizada en la referencia [12]. Los datos de la tabla se graficaron para tener una mejor idea de la variación de temperatura. Nótese que las variaciones son menores a un grado en cuestión de temperatura y también menor a un punto porcentual en RH en los primeros 18 días de incubación. Los últimos 3 días es en donde se observan los cambios más bruscos, sobretodo en humedad relativa. Las gráficas mencionadas aparecen en las Figuras 4.23 y 4.24.

Aún cuando los cambios son pequeños, el controlador debe ser capaz de seguir las trayectorias recordando que existen limitaciones propias del sistema que impiden que se obtenga *exactamente* la misma trayectoria.

⁵Leghorn es una estirpe de ave que se utiliza para producción de huevo, mientras que Ross 308 se utiliza para carne.

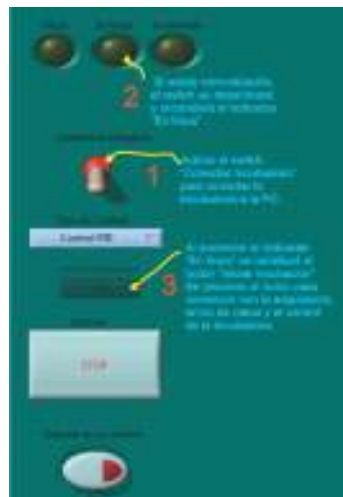


Figura 4.10: Secuencia para conectar la incubadora

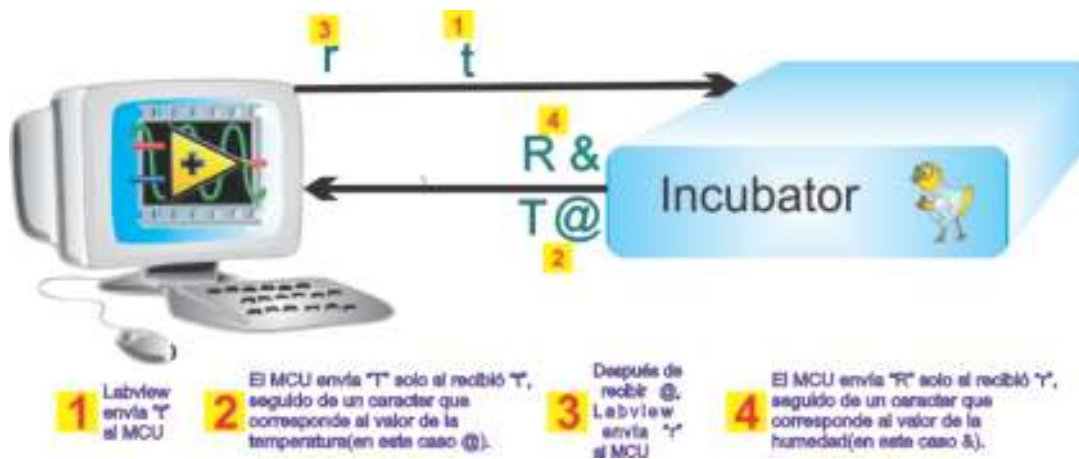


Figura 4.11: Protocolo de comunicación serial

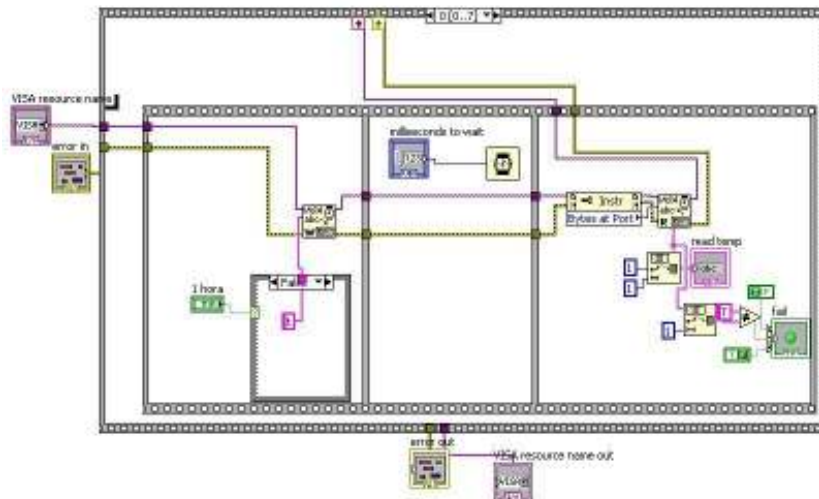


Figura 4.12: Primera parte del SubVI de transmisión serial

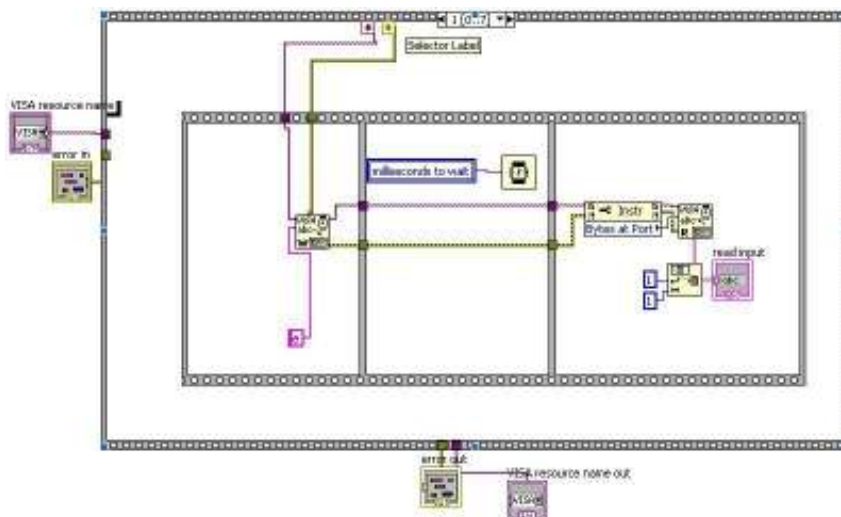


Figura 4.13: Segunda parte del SubVI de transmisión serial

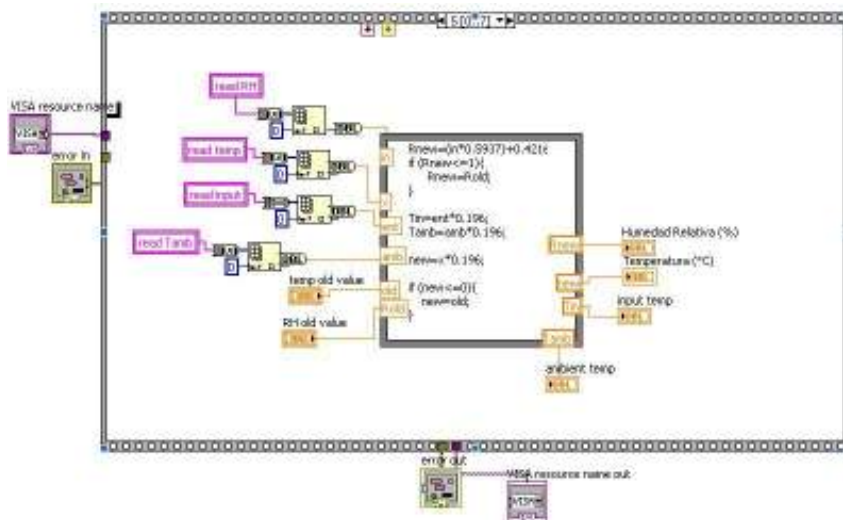


Figura 4.14: Conversión de los caracteres leídos a valores numéricos

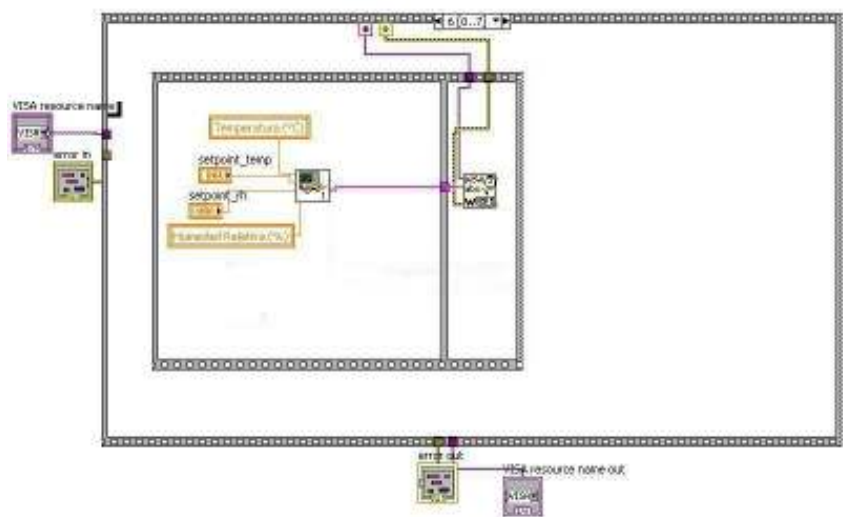


Figura 4.15: Invocación del SubVI responsable del control y envío del resultado al MCU.

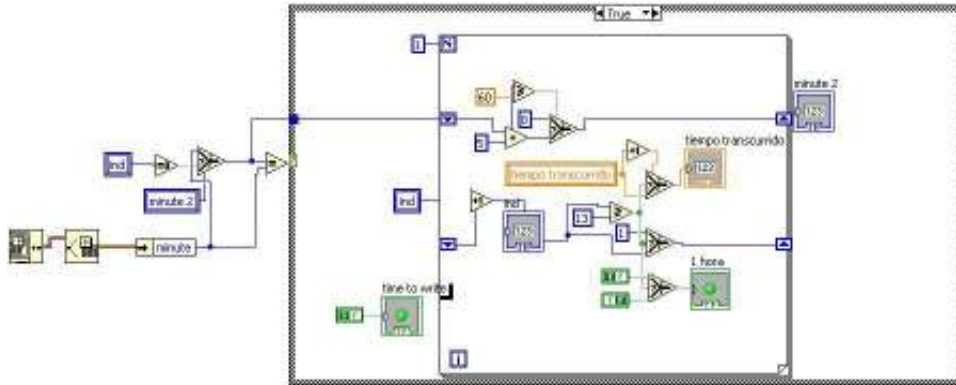


Figura 4.16: Diagrama de bloques del SubVI contador de tiempo



Figura 4.17: Primera parte de la subrutina «Contador de tiempo»

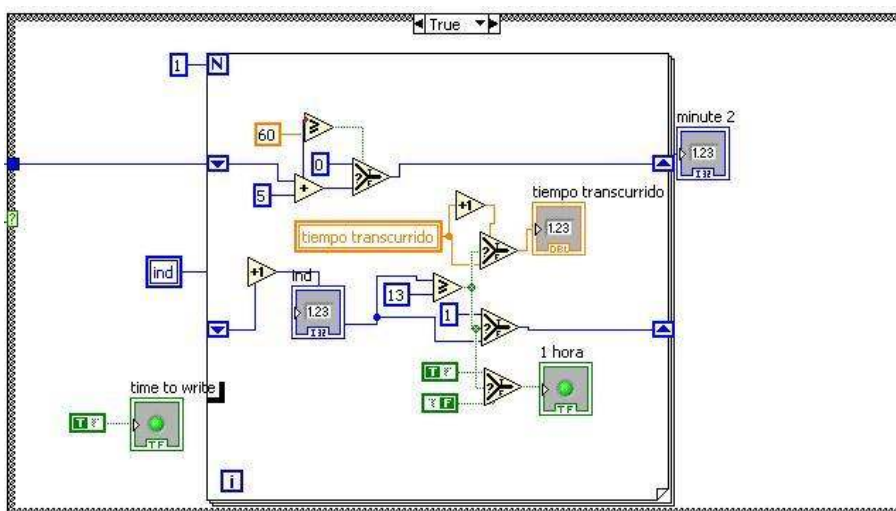


Figura 4.18: Segunda parte de la subrutina «Contador de tiempo»

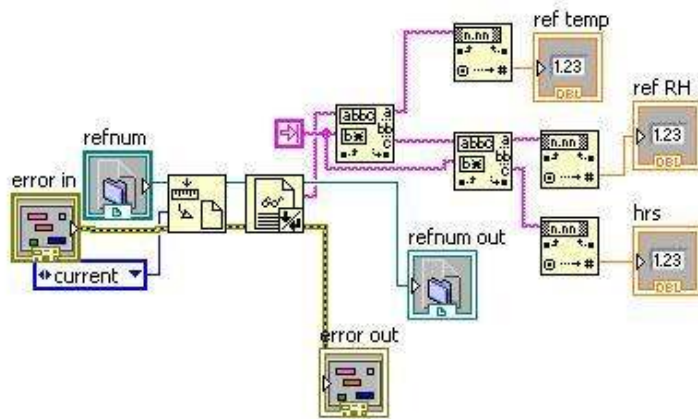


Figura 4.19: Lectura del archivo de referencia



Figura 4.20: Ejemplo de conversión a caracter

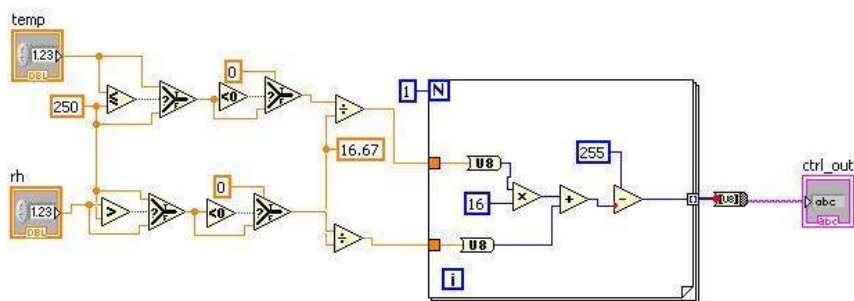


Figura 4.21: Convertidor a caracter

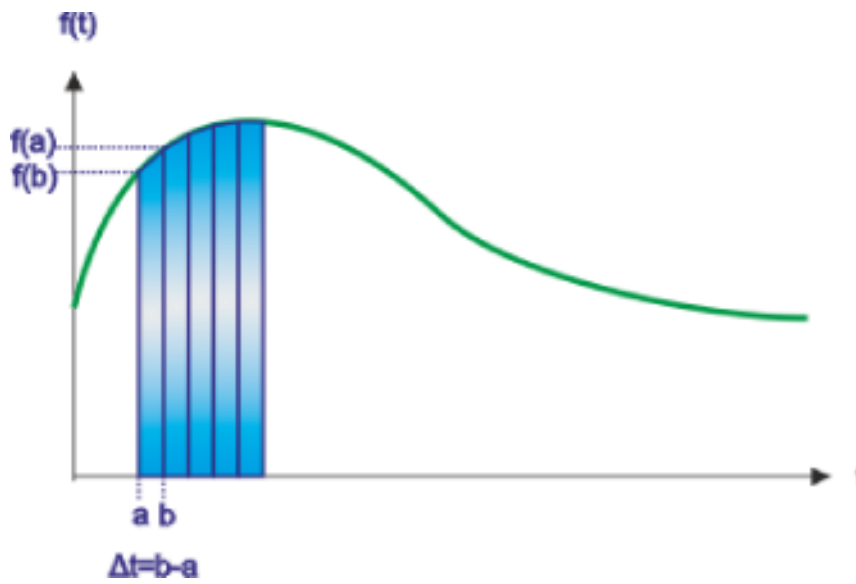


Figura 4.22: Aproximación de la integral como suma de trapecios

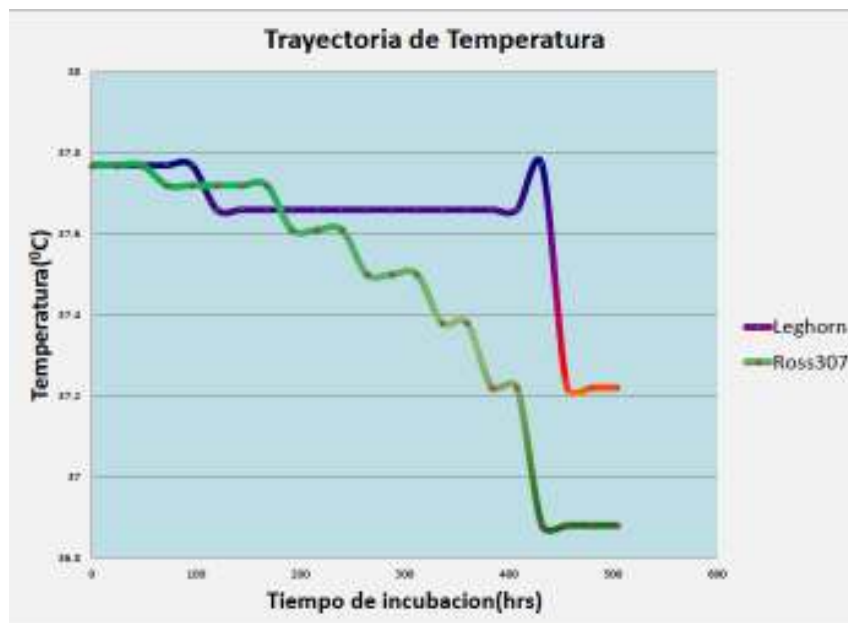


Figura 4.23: Trayectoria de Temperatura

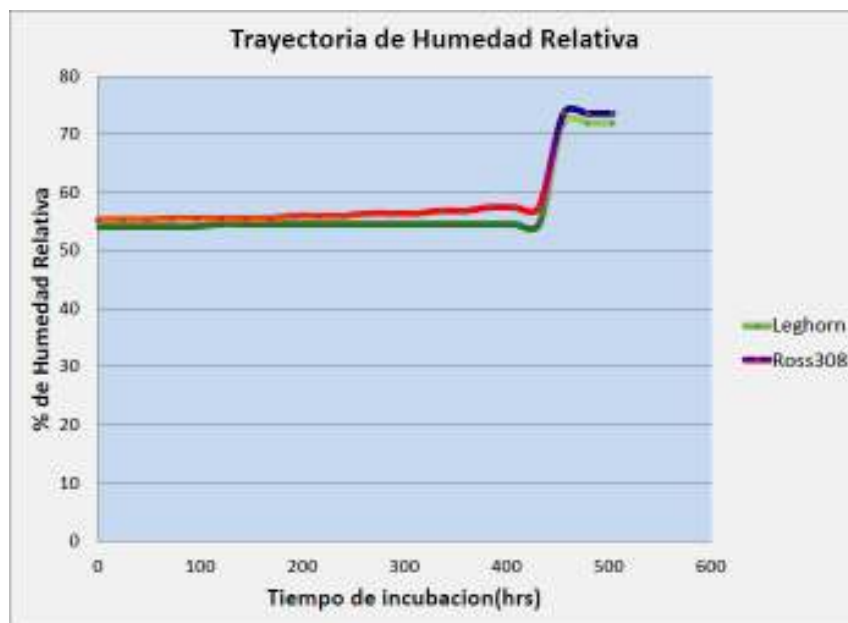


Figura 4.24: Trayectoria de Humedad Relativa

Capítulo 5

Controladores

Un control automático produce una señal de control tal que el error llegue a cero o a un valor aceptable. La incubadora contiene una serie de dispositivos que ayudan a realizar un sistema de control.

Los sensores LM35 así como el módulo de humedad HMZ 433A convierten las señales de entrada (temperatura y humedad) en niveles de voltaje; de esta manera la incubadora obtiene la información del ambiente para poder llevar a cabo la acción de control. En el apéndice B se muestran las características de los sensores utilizados en la incubadora.

Por otra parte, existen actuadores que Ogata [17] define como dispositivos de potencia que producen la señal de entrada para la planta de acuerdo con la señal de control, a fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada de referencia. En la incubadora se tienen tres actuadores: las resistencias, el generador de humedad, y el motor a pasos. En la Figura 5.1 se muestra el diagrama de bloques adaptado del diagrama de bloques mostrado en [17].

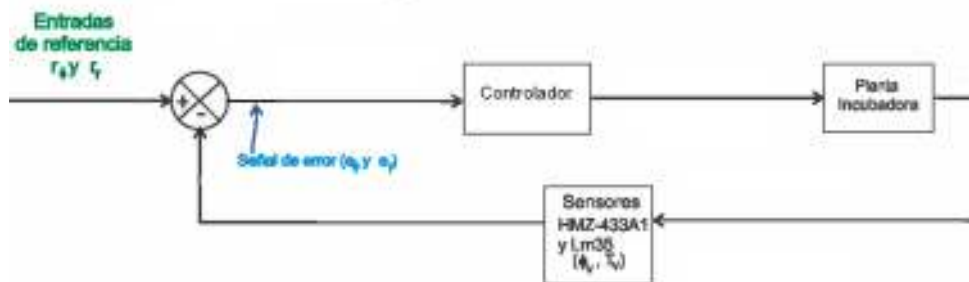


Figura 5.1: Diagrama de bloques adaptado de Ogata [17] para la Incubadora

Antes de analizar los diferentes tipos de controladores, definiremos las siguientes variables:

$u(t)$ = señal de control

$e(t)$ = señal de error

C_1 y C_2 = constantes

K_p = ganancia proporcional

T_i = tiempo integral

T_d = tiempo derivativo

5.1. Modelo Dinámico

El modelo dinámico de un sistema es una representación matemática de la realidad y pretende describir mediante ecuaciones, cómo será la respuesta del sistema ante diferentes entradas, siendo de las más comunes, la entrada escalón. La ventaja de contar con un modelo matemático es que se puede analizar al sistema sin tenerlo físicamente y predecir cómo será su comportamiento ante determinado evento en la vida real.

En el diseño de controladores sirve para conocer antes de implementar el funcionamiento del sistema controlado, su respuesta ante una perturbación y una primera aproximación a la sintonización del controlador con el fin de que el sistema real funcione de la manera deseada.

Su principal desventaja es que para obtenerlo se deben hacer algunas consideraciones, de lo contrario el sistema se vuelve cada vez más complejo pero se apega más a la realidad. Entre más consideraciones se hagan menos fiel será la representación matemática pero se volverá más sencillo.

5.1.1. Conceptos Preliminares

Antes de explicar el modelo matemático es necesario comprender algunos conceptos de termodinámica, puesto que el comportamiento de la incubadora así lo exige. Se pondrá especial énfasis en el concepto de *humedad relativa*.

Es claro que cuando se habla de «humedad en el aire» se hace referencia a la cantidad de vapor de agua que hay en el aire, de otro modo, se habla de una mezcla aire-agua.

Cuando el agua y el aire se mezclan a presiones moderadas, la mezcla puede considerarse como gas ideal cuya presión total será la suma de la presión del aire *seco* más la presión del vapor de agua p_v :

$$p = p_a + p_v \quad (5.1)$$

Esto es, la ley de las presiones de Dalton [11]. Éste concepto se utilizará más adelante para definir a la humedad relativa.

A la relación entre la **masa** de agua con la **masa** de aire en una mezcla agua-aire se le conoce como *humedad específica* y su símbolo es la letra griega omega ω . Se expresa en gramos de agua/kg de aire en el sistema internacional aunque también se puede expresar en $[lbs_v/lbs_a]$ o en granos de agua por libra de aire (7000 granos de agua es igual a una libra en masa) [11]. Ésta definición de humedad es muy útil en análisis de balance de energía, pero resulta poco práctica para indicar cuanta humedad hay en el aire. Por eso se introduce el concepto de *humedad relativa* (ϕ) cuya definición se da a continuación:

Para gases ideales [la humedad relativa] es la razón de la presión parcial del vapor de agua en la mezcla entre la presión parcial del vapor de agua en una mezcla saturada con vapor de agua a la misma temperatura, T_s ¹

$$\phi = \frac{p_v}{p_s} \times 100 \quad (5.2)$$

En otras palabras, la humedad relativa (RH) indica en términos porcentuales la cantidad de vapor de agua que hay en el aire respecto al máximo (100%) que éste puede contener a una *temperatura dada*.

¹Glicksman, Leon R *Air Water Mixtures: Psychrometrics*, 2010

Medición de la RH.- Para medir la RH existen instrumentos llamados *psicrómetros* que aunque hay de varios tipos funcionan de manera similar. Constan de dos termómetros y uno de ellos tiene el bulbo envuelto en una mecha húmeda, es por eso que a la temperatura que éste registra se le llama *temperatura de bulbo húmedo* mientras que el otro termómetro, cuyo bulbo está seco indica la *temperatura de bulbo seco*. Para realizar la medición se toman ambas lecturas y se consulta una carta psicrométrica -que se explicará brevemente más adelante.-

A pesar de que actualmente existen sensores de humedad que aprovechan las características de ciertos materiales para cambiar su resistencia eléctrica o su capacitancia conforme varía la cantidad de vapor en el aire (como es el caso del utilizado en este proyecto) el psicrómetro sirve para ilustrar una característica de la RH: varía con la temperatura -y con la presión.-

La Carta Psicrométrica.- La carta psicrométrica como la que se muestra en la Figura 5.2 indica de modo gráfico la relación entre la temperatura de bulbo seco, bulbo húmedo, humedad específica, humedad relativa, entre otras variables.

Es importante notar que la carta psicrométrica está dada para una presión atmosférica determinada. La que aparece en la Figura 5.2 es para una altura de 2250 metros sobre el nivel del mar ([msnm]) que corresponde a la Ciudad de México (2240 [msnm]).

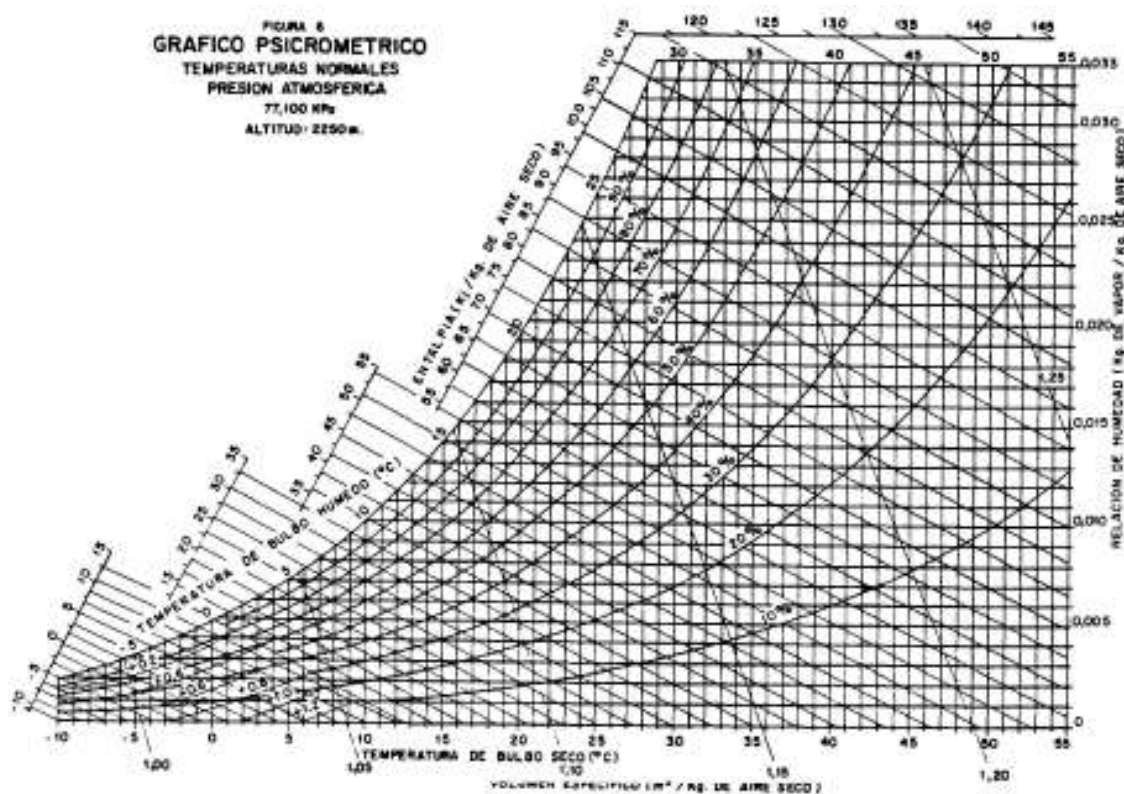


Figura 5.2: Carta psicrométrica a 2250 msnm

Sistemas térmicos.- De acuerdo a Ogata [17] un sistema térmico es aquel que involucra intercambio de calor entre 2 sustancias, por lo que la incubadora puede ser considerada de este tipo.

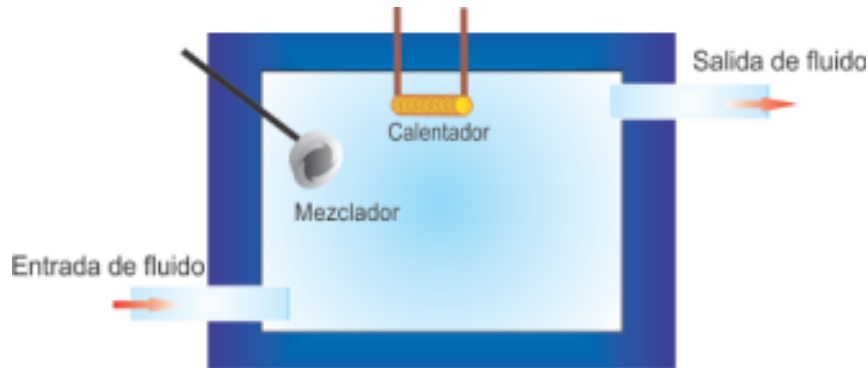


Figura 5.3: Sistema térmico

Éstos sistemas pueden modelarse haciendo una analogía con circuitos eléctricos, en términos de resistencia y capacitancia térmica; la temperatura entonces se considera análoga al voltaje mientras que el calor lo es a la corriente. Las ecuaciones de conjunto son las leyes de Kirchoff que gobiernan a los circuitos eléctricos [20].

Ésta representación, sin embargo, puede ser inexacta si se modela como parámetros concentrados pues tanto la resistencia como la capacitancia se hayan distribuidos por toda la sustancia; mas para simplificar el análisis se considera que el sistema puede representarse por medio de parámetros concentrados, que aquellos elementos comportándose como resistencia térmica, tienen una capacitancia (térmica) despreciable y viceversa. Que las paredes no almacenan calor y que el sistema está aislado térmicamente y que las sustancias están perfectamente mezcladas [17].

5.1.2. Modelos propuestos

Existe muy poca bibliografía acerca de modelos matemáticos propuestos para una incubadora, sin embargo se sabe que se comporta como un sistema térmico y que se debe considerar tanto la temperatura como la humedad relativa.

En [17] se propone el modelo de un sistema térmico como el que se muestra en la Figura 5.3

La ecuación diferencial para este sistema es

$$RC \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{RC}\theta + \frac{1}{RC}\theta_i + \frac{1}{C}h_i \quad (5.3)$$

donde R y C son las constantes de resistencia y capacitancia térmica respectivamente, θ es la temperatura del fluido, θ_i es la temperatura del fluido a la entrada y h_i es la entrada de calor.

Si se observa la Figura 5.3 se notará que es muy similar a la incubadora; sin embargo, el modelo matemático no considera a la humedad relativa.

Por otra parte, el análisis de Rubio [21] es específicamente para una incubadora y resuelve el problema de la humedad relativa modelando en primer lugar a la temperatura en el interior como

$$\dot{x} = -\frac{2.31}{C_{cap}}x + f(t) + \frac{1}{4410C_{cap}}u \quad (5.4)$$

Donde $x = T_i$ que es la temperatura en el interior de la incubadora $f(t)$ es una función que depende de la temperatura inicial y u es la entrada del sistema.

En este modelo tampoco se considera a la humedad relativa. El mismo Rubio indica que no es sencillo modelar la humedad relativa pero el problema se corrige al modelar la humedad relativa por medio



Figura 5.4: Diagrama de bloques del sistema

de una red neuronal tomando el valor de la temperatura.

El modelo para la humedad relativa que se obtiene en [21] y [22] es

$$z = 92.7746(1.01087 + 0.0496943x_1 - 0.0497837x_2) \quad (5.5)$$

donde z es la humedad relativa, x_1 es la temperatura de bulbo húmedo y x_2 representa a la temperatura de bulbo seco

Este modelo se utiliza para predecir el valor de la humedad en la incubadora por lo que no se requiere un sensor de humedad.

La desventaja de esta propuesta es que no considera el efecto de la humedad relativa sobre la temperatura y tampoco proporciona una idea sobre la dinámica de la RH, tan solo predice su valor numérico.

5.1.3. Modelo Utilizado

El modelo propuesto se adaptó de [20]. El esquema del sistema se muestra en la Figura 5.4.

Como se podrá observar el sistema tiene por objetivo *enfriar* el espacio térmico por medio del flujo de aire que entra en el mismo. En la incubadora se necesita *calentar* el aire que entra manteniendo el flujo constante. Aún así puede decirse que la incubadora se comporta de manera análoga a diferencia de utilizar un intercambiador de calor para enfriar se utiliza una resistencia para calentar, por lo tanto la dirección de flujo del calor se invierte y eso se reflejará en el modelo matemático únicamente en un signo.

Ecuaciones Diferenciales que describen al sistema

Las ecuaciones de este sistema provienen de una analogía con un circuito eléctrico RC (temperatura) y del principio de conservación de la masa (humedad).

Considerando que el aire y el vapor de agua se comportan como gases ideales, que están perfectamente mezclados, que el proceso se lleva a cabo a presión constante; que no hay almacenaje de calor en las paredes y, que el efecto del ventilador es despreciable se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{60f}{V_s} (T_2 - T_3) - \frac{60h_{fg}}{c_p V_s} (W_2 - W_3) + \frac{1}{0.25\rho V_s c_p} (Q_0 - h_{fg}M_0) \quad (5.6)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{60f}{V_{he}} (T_3 - T_2) + \frac{(0.25)60f}{V_{he}} (T_0 - T_3) - \frac{60h_w f}{V_{he} c_p} (0.25W_0 + 0.75W_3 - W_2) - 6000 \frac{gpm}{\rho c_p V_{he}} \quad (5.7)$$

$$\frac{dW_3}{dt} = \frac{60f}{V_s} (W_2 - W_3) + \frac{1}{\rho V_s} M_0 \quad (5.8)$$

El significado de los elementos se describe en la Tabla 5.1.

h_w	Entalpía del agua líquida
W_0	Relación de humedad del aire exterior
h_{fg}	Entalpía del vapor de agua
V_{he}	Volumen del intercambiador de calor
W_2	Humedad absoluta del suministro de aire
W_3	Humedad absoluta del espacio térmico
c_p	Calor específico del aire
T_0	Temperatura del aire exterior
M_0	Carga de humedad
Q_0	Carga de calor sensible
T_2	Temperatura del suministro de aire
T_3	Temperatura del espacio térmico
V_s	Volumen del espacio térmico
ρ	Densidad de la masa de aire
f	Tasa de flujo de aire volumétrico
gpm	Tasa flujo de agua helada

Tabla 5.1: Nomenclatura

Como se desea obtener la humedad relativa y no la humedad absoluta se recurre a la carta psicrométrica para obtener la relación entre la segunda y la primera. En [20] se ajustó utilizando un punto de operación de $T_3 = 75 [^{\circ}F]$ y $W_3 = 0.007 [lbm/lbm]$. La ecuación resultante para la humedad *relativa* en función de la temperatura de bulbo seco T_3 es:

$$\Phi_r (\%) = 5000W_3 - 1.388T_3 + 107 \quad (5.9)$$

y si se deriva se obtiene la variación de la humedad en términos de la temperatura

$$\frac{d\Phi_r (\%)}{dt} = 5000 \frac{dW_3}{dt} - 1.388 \frac{dT_3}{dt} \quad (5.10)$$

Cuando se analizan las Ecuaciones (5.6), (5.7) y (5.8) así como la Tabla 5.1 se puede observar que las únicas variables son T_2 , T_3 , W_2 y W_3 . El resto de las literales son constantes.

Por otra parte, la Ecuación (5.7) indica el comportamiento de la temperatura en el interior de la tubería y $\frac{dT_2}{dt}$ no aparece en las Ecuaciones (5.6) y (5.8). Como no es necesario conocer este parámetro para el objetivo de esta tesis, se puede prescindir de la mencionada ecuación. El valor de T_2 se obtiene mediante un sensor.

De igual manera si se despeja la Ecuación (5.9) es posible encontrar el valor de W_3 a partir del valor de la humedad relativa en el interior de la incubadora, el cual está dado por un sensor.

Espacio de Estados

Una vez que se tienen la Ecuación 5.10 se puede manipular para que quede en términos de ϕ_r y T_3 . Para ello se definen las siguientes constantes con el fin de simplificar el cálculo.

$$\begin{aligned} \alpha &= 5000; & \beta &= \frac{60f}{V_s}; \\ \gamma &= \frac{1.388\Omega h_{fg}}{c_p \alpha} & \delta &= \frac{Q_0 - h_{fg} M_0}{0.25\rho V_s c_p} \\ \Omega &= \frac{60f}{V_s} \end{aligned}$$

Así, el modelo matemático para la humedad relativa y la temperatura en el interior de la incubadora se expresa por medio de las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_r}{dt} &= [1.388(2\Omega - \gamma)]T_3 - (\Omega + \gamma)\phi_r - 1.388\Omega T_2 + [\alpha(\Omega + \gamma)]W_2 - \\ &\quad - 107\Omega + \frac{\alpha}{\rho V_s}M_0 + 107\gamma - 1.388\delta \\ \frac{dT_3}{dt} &= (\gamma - \Omega)T_3 + 1.388\gamma\phi_r - 1.388\gamma\alpha W_2 + \Omega T_2 - 77.089\gamma + \delta\end{aligned}\quad (5.11)$$

En este punto ya es posible reescribir el modelo matemático en el espacio de estados en la forma

$$\dot{x} = Ax + Bu + W$$

donde

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{T}_3 \end{bmatrix}$$

por lo que

$$x = \begin{bmatrix} \phi_r \\ T_3 \end{bmatrix}$$

son las variables de estado. La matriz A se muestra a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} -(\Omega + \gamma) & 1.388(2\Omega - \gamma) \\ -1.388\gamma & \gamma - \Omega \end{bmatrix}$$

La matriz B es la matriz de coeficientes relacionada a las entradas representada por el vector u . Éstas entradas se definen como T_2 -que corresponde a la temperatura en el interior de la tubería- y W_2 que es la humedad específica de entrada.

Como el sensor proporciona la lectura de humedad *relativa* es necesario encontrar una ecuación que relacione la humedad específica con la humedad relativa. Antes de obtenerla, se da la definición de humedad específica

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

donde P_v es la presión parcial de vapor de agua y P es la presión atmosférica. Manipulando ésta expresión con la expresión 5.1. así como la definición de humedad relativa se obtiene

$$\omega = \frac{0.622\phi}{100 + \phi}$$

Sin embargo, para efectos del modelo se considerará a la humedad específica W_2 . La matriz B se muestra enseguida.

$$B = \begin{bmatrix} -1.388\Omega & \alpha(\Omega + \gamma) \\ \Omega & -1.388\gamma\alpha \end{bmatrix}$$

Y el vector u de entrada es:

$$u = \begin{bmatrix} T_2 \\ W_2 \end{bmatrix}$$

Finalmente se tiene a la matriz W que es una matriz de constantes y engloba a aquellas que no tienen relación con alguna de las variables de estado o con las entradas. Así, ésta matriz es

$$W = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{\rho V_s}M_0 + 107\gamma - 107\Omega - 1.388\delta \\ \delta - 77.089\gamma \end{bmatrix}$$

La salida esta dada por $y = Cx$:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_r \\ T_3 \end{bmatrix}$$

El valor de las constantes puede encontrarse en la referencia [20]; sin embargo, el valor de las mismas está expresado en unidades del sistema inglés, por lo que haciendo las conversiones necesarias se obtienen los valores de las constantes, las cuales se muestran en la Tabla 5.2

NOMBRE	SÍMBOLO	VALOR
Entalpía del vapor de agua	h_{fg}	2520.421 $\frac{kJ}{kg}$
Calor específico del aire	c_p	19.019 $\frac{kJ}{kg^\circ C}$
Flujo volumétrico de aire	f	8.5 $\frac{m^3}{s}$
Volumen del intercambiador de calor	V_{he}	1.72 m^3
Carga de calor sensible	Q_o	85.388 $\frac{kJ}{s}$
Carga de humedad	M_o	0.021 $\frac{kg}{s}$
Densidad de la masa de aire	ρ	1.11 $\frac{kg}{m^3}$
Volumen del espacio térmico	V_s	1655.52 m^3

Tabla 5.2: Valor de las constantes en unidades del SI

Con estos valores el modelo dinámico es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{T}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.319 & 0.839 \\ -0.016 & -0.292 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_r \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.428 & 1596.966 \\ 0.308 & -78.65 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ W_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -31.698 \\ -0.87 \end{bmatrix}$$

5.2. Control ON-OFF

El **Control Encendido-Apagado** es un control tal que sus elementos de actuación sólo tienen dos posiciones fijas, de manera que una posición está activa mientras la variable controlada es *menor que* la referencia y se desactiva cuando la variable controlada es *mayor o igual que* la referencia. En el caso de la incubadora, por ejemplo, las resistencias estarán encendidas mientras la temperatura no llegue a la referencia. al llegar y sobrepasar, éstas se apagarán hasta que la temperatura descienda nuevamente por debajo de la referencia activándose nuevamente. Ésta acción de control tiene como consecuencia que la variable controlada siempre esté oscilando alrededor de la referencia. A esta oscilación se le conoce como *brecha diferencial* y se ilustra en la Figura 5.5 Generalmente las incubadoras comerciales de capacidades pequeñas utilizan un termostato que es el responsable de realizar esta acción del control y su principal ventaja es que es relativamente barato y sencillo. Debido a las acciones del control ON-OFF se analizan otros tipos de controladores, esto es para que dicha señal de error posea un rango de error más pequeño que el que puede proporcionar un controlador ON-OFF.

5.3. Control PID

La acción de **control Proporcional (P)** que es tal que la relación entre $u(t)$ y $e(t)$ esta dada por:

$$u(t) = K_p e(t)$$

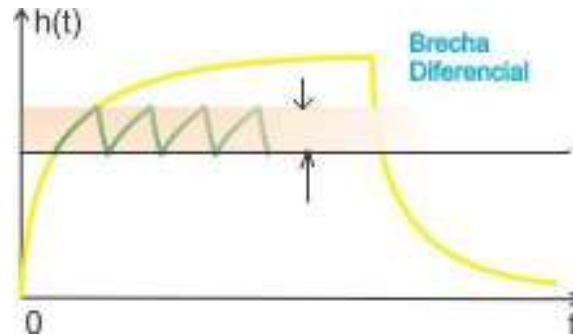


Figura 5.5: Brecha diferencial de un control ON-OFF

A este tipo de control es considerado como amplificador de ganancia ajustable y tiende a estabilizar al sistema a coste de introducir el error en estado estable. Un control proporcional necesita, en general, de ganancias elevadas.

La acción de **Control Integral(I)** que es tal que $u(t)$ cambia a razón proporcional a $e(t)$. Esto significa que si el valor de $e(t)$ aumenta n veces, el valor de $u(t)$ varía n veces más rápido. Cuando $e(t) = 0$, $u(t)$ permanece estacionario. Por lo tanto el control integral esta dado por:

$$u(t) = \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

donde T_i ajusta la acción de control, mientras que K_i ajusta a la parte proporcional del control. $\frac{1}{T_i}$ se le conoce como velocidad de ajuste y es la frecuencia en la que se duplica la parte proporcional en la acción del control. Este control elimina el error en estado estable pero incrementa el orden del sistema.

Finalmente, la acción de un **Control Proporcional-Derivativo (PD)** se define mediante:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d T_d \frac{de(t)}{dt}$$

T_d es el intervalo de tiempo donde durante el cual la acción de la velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional. A este tipo de control se le conoce como control de previsión. Sólo es eficaz en periodos transitorios y su ventaja es que amplifica señales de ruido, por lo que podría provocar saturación en los actuadores.

Una vez mencionados cada uno de los controles, el **Control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)** es la combinación de los controles mencionados y se define como:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_d T_d \frac{de(t)}{dt}$$

En la Figura 5.6 se muestran las acciones de control suponiendo que el error realiza una rampa.

En la incubadora se utilizó un control PID.

5.4. Control por Retroalimentación de Estados

La idea detrás de la realimentación (o retroalimentación) de estados es utilizar el valor del estado x como señal de control tal como lo muestra la Figura 5.7.

De este modo la señal de control u queda como

$$u = Kr - Kx \quad (5.12)$$

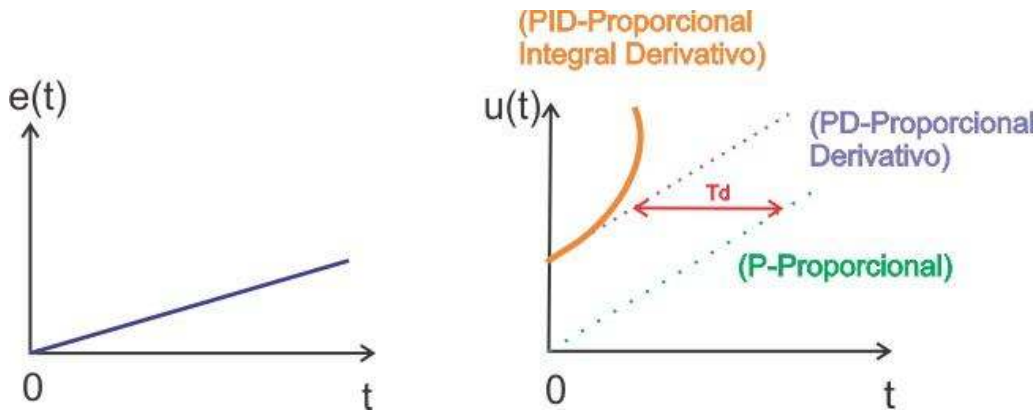


Figura 5.6: Diferencia entre los controladores

Es importante mencionar que si $r=0$ el control es de tipo *regulador* lo que significa que ante una perturbación el sistema regresará al punto donde se encontraba antes de este evento. Al respecto Ogata menciona

Si se elige la matriz K en forma adecuada [...] es posible hacer que $x(t)$ tienda a 0 conforme t tiende a infinito. Los valores característicos de la matriz $A - BK$ se denominan polos reguladores. Si éstos se ubican en el semiplano izquierdo del plano S , entonces $x(t)$ tiende a 0 conforme t tiende a infinito. El problema de ubicar los polos en lazo cerrado en las posiciones deseadas se denomina problema de ubicación de polos.²

De lo anterior se deduce que la matriz K de ganancias será la responsable de ubicar los polos en lazo cerrado en las posiciones que se desean.

Para que la ubicación de polos sea posible en cualquier posición deseada el sistema tiene que ser *completamente controlable*. Esta condición es *necesaria y suficiente* para la colocación arbitraria de polos. Para determinar si es de estado completamente controlable se debe recurrir a la matriz de controlabilidad que se define como

$$M = \begin{bmatrix} B & AB & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Si el rango de esta matriz es n entonces el sistema será completamente controlable, lo que significa que «es posible construir una señal de control sin restricciones que transfiera un estado inicial a un estado final en un intervalo de tiempo finito»³

En el caso del sistema en cuestión la matriz de controlabilidad es:

$$M = \begin{bmatrix} -0.428 & 1.597 \times 10^3 & 0.395 & -576.083 \\ 0.308 & -78.65 & -0.085 & -1.783 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

y su rango $\text{rank}(M) = 2$. Dado que el número de estados $n = 2$ el sistema es *completamente controlable* y la ubicación arbitraria de polos es posible.

Una vez que se ha hecho lo anterior se calcula la matriz K de ganancias⁴ como

²OGATA, Katsuhiko (2003), *Modern Control Engineering*, EUA: Pearson Education, p. 788

³*idem*

⁴Los valores de la matriz K fueron dados arbitrariamente

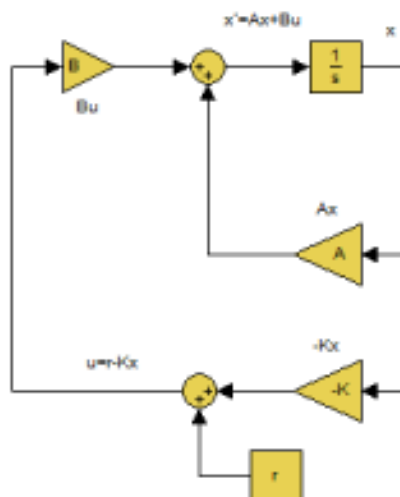


Figura 5.7: Sistema retroalimentado

$$k = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.3 & 1.5 \\ 0.2 & 0.7 \end{bmatrix}$$

y la señal de control para que el sistema sea de tipo regulador es

$$u = -Kx - B^{-1}W$$

Obsérvese que aparece un término $B^{-1}W$ que no se mencionó en la ecuación 5.12. Éste término se introdujo para «eliminar» a la matriz W y que la ecuación del sistema en lazo cerrado quede como

$$\dot{x} = (A - Bk)x \quad (5.15)$$

Las siguientes gráficas mostradas en la Figura 5.8 son el resultado de una simulación utilizando el modelo matemático de la incubadora así como los valores de ganancias dados arriba. Se supone que el estado inicial es $x_i(0) = 0$ donde $i = 1, 2$. Una perturbación impulso en $t = 0$ saca a los estados de ese estado inicial y el control por retroalimentación hace que los estados regresen al punto donde se encontraban antes de la perturbación.

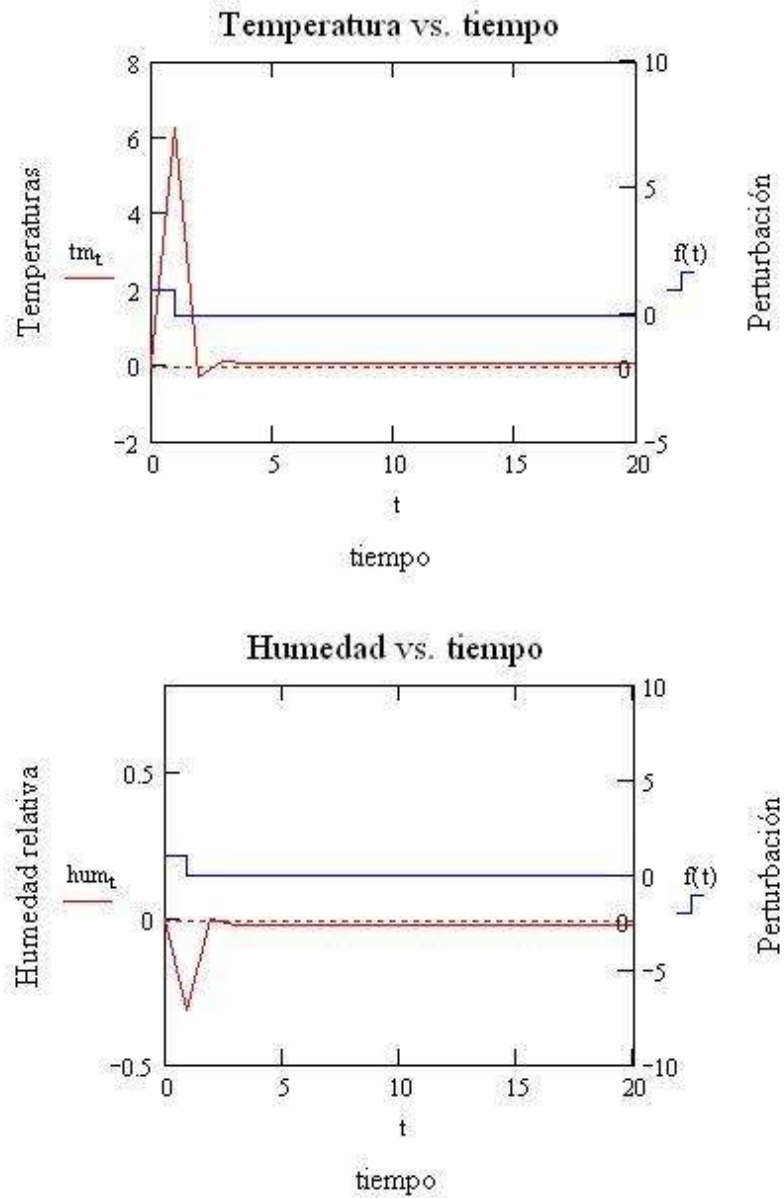


Figura 5.8: Resultado de una simulación aplicando control tipo regulador en lazo cerrado

Capítulo 6

Resultados Experimentales

Con el fin de determinar el controlador que mejor se adapta a las necesidades de la incubadora se diseñó el siguiente experimento:

Implementar un control ON-OFF para temperatura y humedad que servirá de referencia (puesto que este es de los controles más utilizados). Posteriormente se cambiará por los siguientes controladores:

1. Control PID
2. Control en el Espacio de Estados

Control ON-OFF.- La prueba control se corrió durante 4 horas con un tiempo de ejecución de la rutina del motor despreciable (aunque sí se llevó a cabo el giro, éste se hizo en menos de un segundo) habilitando temperatura y humedad. La incubadora se pre-humedeció durante 20 minutos hasta alcanzar una humedad relativa de 100 % sin conectar temperatura. Pasado ese tiempo se habilita la temperatura e inicia la prueba con el control ON-OFF. Las gráficas obtenidas se muestran en las Figuras 6.1 y 6.2.

Cabe mencionar que a pesar de que los resultados se muestran en gráficas independientes, ambas variables fueron controladas simultáneamente.

Obsérvese como el control para temperatura tuvo un comportamiento más estable que el de RH que presenta muchos picos a pesar de seguir razonablemente bien a la referencia no se mantiene en ella por mucho tiempo y esta ya sea por encima o por debajo de ella. Este fenómeno -llamado «brecha diferencial»- se mencionó en el capítulo 5 y es una característica típica de los controladores de tipo ON-OFF.

En promedio, el error es de 2.04 %. El punto máximo excede en 2.45 % el valor de la referencia mientras el mínimo se desvía 5.39 % de la misma.

En cuanto a la humedad relativa el seguimiento no es tan bueno como en la temperatura. Es interesante notar que en general se mantiene por debajo o justo sobre la referencia y en pocos casos la excede. No es de extrañar que el error máximo para éste último casi sea de 1.31 % mientras que en estado estable el punto mínimo difiere 14.73 % de la referencia, el cual es muy elevado.

Obsérvese también que hacia el final de la gráfica se observa un decaimiento brusco en la humedad relativa; esto se debió a una falla física del sistema y por tanto el controlador no pudo compensarlo; sin embargo, esta variación se ve como una perturbación para la temperatura y no se refleja, pues fue compensada automáticamente por el controlador. Con ésto se demuestra que ambas variables se controlan de manera independiente y que un cambio brusco en una no afectará a la otra de manera significativa.

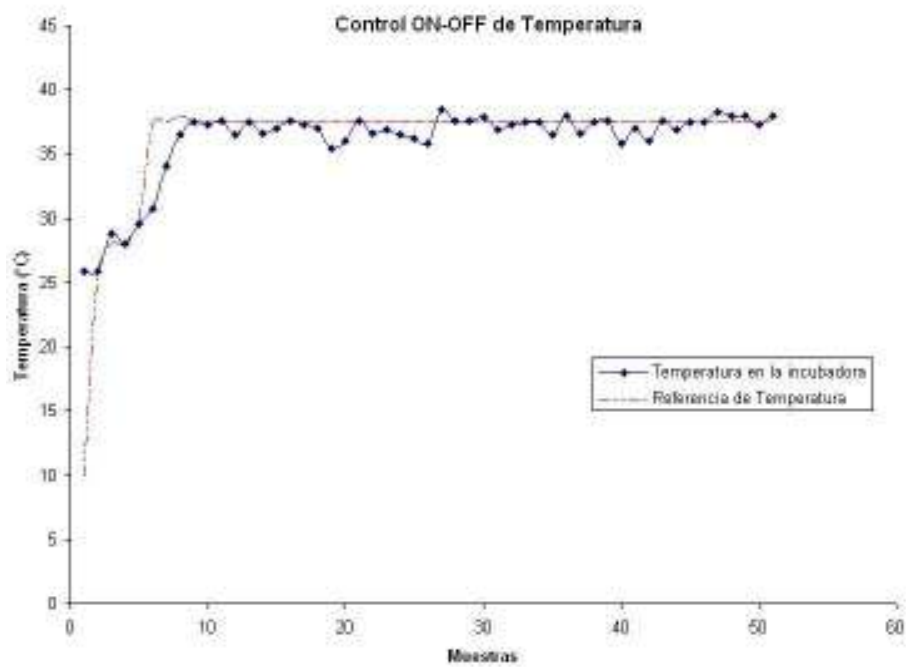


Figura 6.1: Gráfica que muestra el comportamiento del sistema con un controlador ON-OFF para temperatura

Control PID.- Con el fin de probar que el control programado respondiera correctamente, se implementó en primer lugar únicamente para temperatura. Aquí el problema principal consiste en encontrar las ganancias K_p , K_i y K_d adecuadas para que el sistema responda como se desea.

Si se elige una ganancia K_i muy grande se obtiene una respuesta que exhibe oscilaciones sostenidas lo cual es indeseado pues nunca llega a un valor final. además de que el error es de cerca de 3 grados sobre o debajo de la referencia, lo cual es inaceptable. La Figura 6.3 ilustra lo hasta aquí mencionado. Cabe mencionar que el tiempo de muestreo Δt fue de 40 [ms] calculado en base a los tiempos de retardo que utiliza el programa de NI LabView para enviar y recibir datos del microcontrolador.

Por otra parte, si se eligen las ganancias correctamente (Figura 6.4) el control PID proporciona un desempeño bastante satisfactorio, pues tiene un tiempo de levantamiento de cerca de 45 [min] (casi igual al control ON-OFF); un sobrepaso máximo de 4.7105% y un valor en el estado estable muy próximo a la referencia presentando un par de oscilaciones antes de llegar a éste punto. El valor en el estado estable difiere en promedio 0.204°C de la referencia, lo que representa un 0.53%, en comparación con el 2.04% de error que presenta el control ON-OFF.

Finalmente, la Figura 6.5 muestra el comportamiento del sistema con el control PID ante cambios en la referencia con ganancias $K_p = 5.2$, $K_d = 3.9$, $K_i = 0.02$. Obsérvese que el control sigue bastante bien los cambios y si se le da un tiempo razonable antes del siguiente cambio es capaz de llegar al estado estable como sucede en la Figura 6.3. Si los cambios son bruscos o muy rápidos es normal que no se logre el estado estable pues mientras el sistema se estabiliza ocurre otro cambio antes de que esto suceda. También hay que considerar que el sistema no responde *inmediatamente* ante los cambios debido a la dinámica del mismo sistema. En particular, un sistema térmico es muy lento en comparación con otros sistemas (v.g. eléctrico o mecánico). Por esta razón no se tendrá *exactamente* la misma forma de la referencia sino una aproximación. Para juzgar el desempeño del controlador se debe considerar que tan fiel debe ser la aproximación de la respuesta a la referencia, en qué tiempo ocurren los cambios y que tan rápido responde el sistema ante ellos.

En base a la sección 4.3 se observa que los cambios no son muy grandes y que ocurren con mucho tiempo de separación uno de otro (aproximadamente 24 horas después de que ocurrió el primero), por lo que hay suficiente tiempo para que el sistema responda y se estabilice. Además, los cambios no son muy grandes, tan solo uno o dos grados de diferencia.

Por lo tanto, el control PID seleccionado para temperatura proporciona un resultado bastante satisfactorio para las demandas de la aplicación.

Control en el Espacio de Estados.- La Figura 6.6 muestra el comportamiento de la temperatura cuando se utiliza un control por realimentación de estados, mientras que la Figura 6.7 hace lo propio con la humedad. Obsérvese que ambas gráficas tienen un comportamiento exponencial y no presentan sobrepaso como ocurre con el PID. Las ganancias utilizadas para el experimento fueron $k_1 = 100$, $k_2 = 5.25$, $k_3 = 0.68$ y $k_4 = 200$. Nótese que las ganancias k_1 y $k_4 = 100$ con muy altas en comparación con k_2 y k_3 por lo que éstos términos resultan irrelevantes; de igual manera, el término $-B^{-1}W$ es muy pequeño en comparación con las ganancias mencionadas y resulta despreciable.

Resulta interesante el comportamiento de la temperatura cuando se utiliza la retroalimentación de estados, pues nunca se llega al valor de la referencia y permanece alrededor de 0.6°C debajo de la misma. Esto se debe al comportamiento del control, pues conforme el valor de la variable controlada se aproxima a la referencia, el error tiende a cero, por lo tanto la señal de control disminuye. Para este caso, la potencia enviada a las resistencias como acción de control es insuficiente para elevar la temperatura lo necesario para que alcance a la referencia; sin embargo, esto no significa que el control no funcione sino que se requiere una ganancia aún mayor para hacer que la señal de control sea mayor cuando se aproxime a la referencia.

Con la humedad relativa también se observa un comportamiento exponencial pero aquí sí se llega a un 99% de la referencia. En promedio, la RH está en 29.77% con una referencia de $RH = 30\%$.

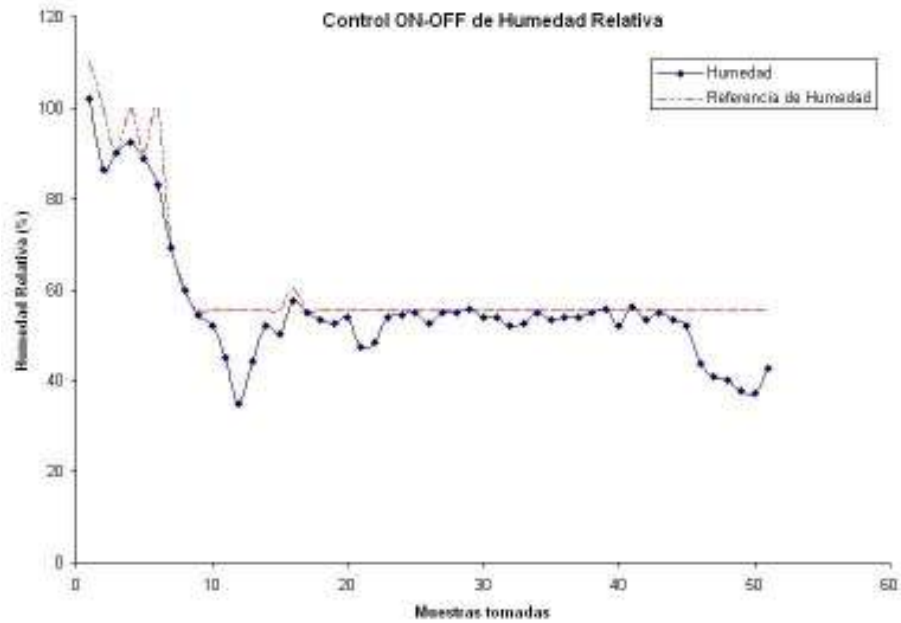


Figura 6.2: Gráfica que muestra el comportamiento del sistema con un controlador ON-OFF para humedad relativa

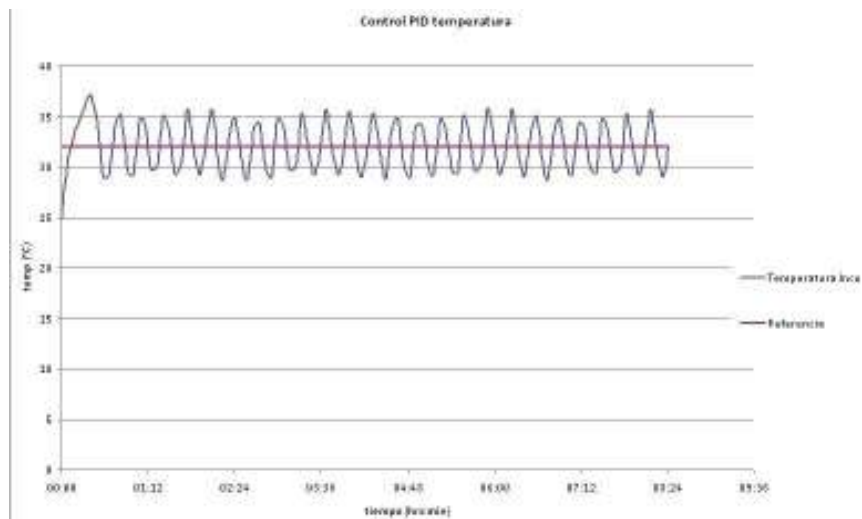


Figura 6.3: Control PID con oscilaciones sostenidas

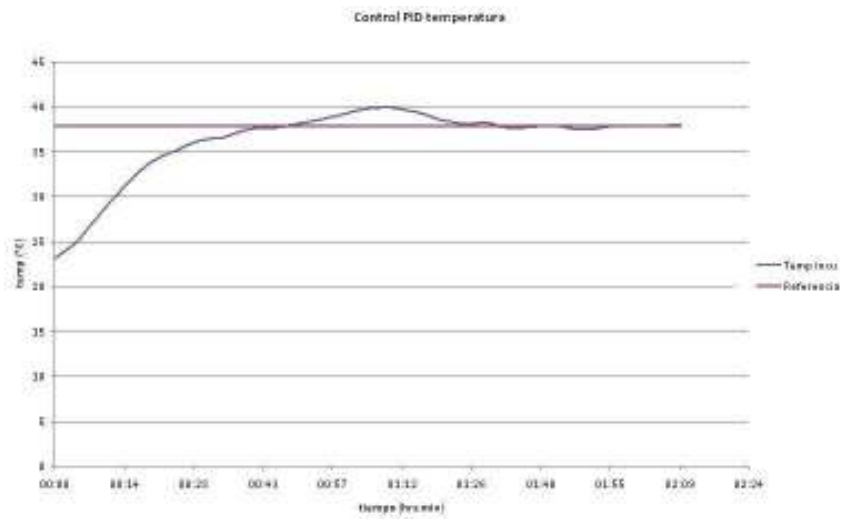


Figura 6.4: Control PID con ganancias óptimas

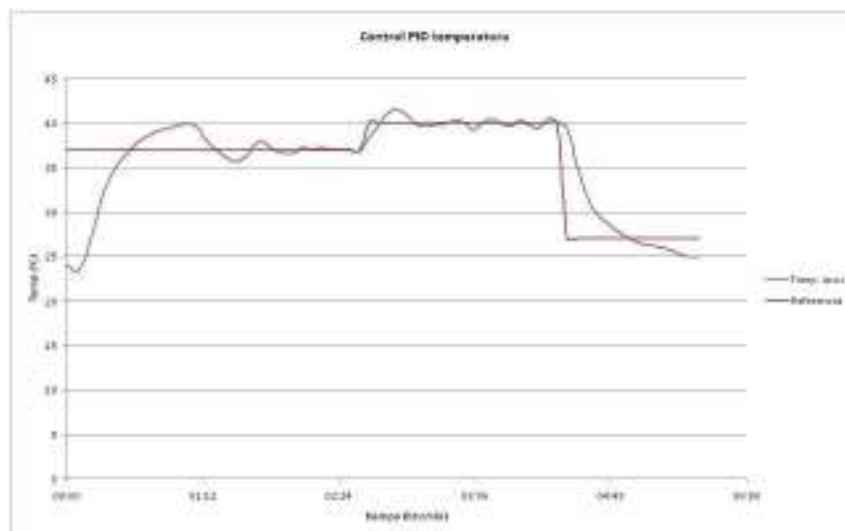


Figura 6.5: Control PID siguiendo un cambio en la referencia

Ésta diferencia representa un 0.75 % de error ligeramente mayor que el error con un control PID para temperatura.

La respuesta exponencial de la temperatura y la humedad relativa se explica porque un control por retroalimentación de estados con la forma de la ecuación 4.3 con las ganancias consideradas se convierte en la ecuación 6.1

$$\begin{aligned} u_1 &= e_1 k_1 \\ u_2 &= e_2 k_4 \end{aligned} \tag{6.1}$$

que es un control proporcional. Como el sistema es de primer orden resulta lógico que el sistema controlado presente una respuesta de un sistema de este tipo que tienen como respuesta un comportamiento exponencial. Note que el sistema modo regulador es realmente un sistema de seguimiento cuya referencia siempre será el estado inicial en el que se encontraba el sistema al momento de comenzar a utilizar este control, por lo que su respuesta será idéntica a la de un control modo seguimiento con una referencia arbitraria. La diferencia es que el segundo admite cambios en el *set point* mientras que el primero no.



Figura 6.6: Gráfica de la temperatura en la incubadora utilizando control en el espacio de estados.

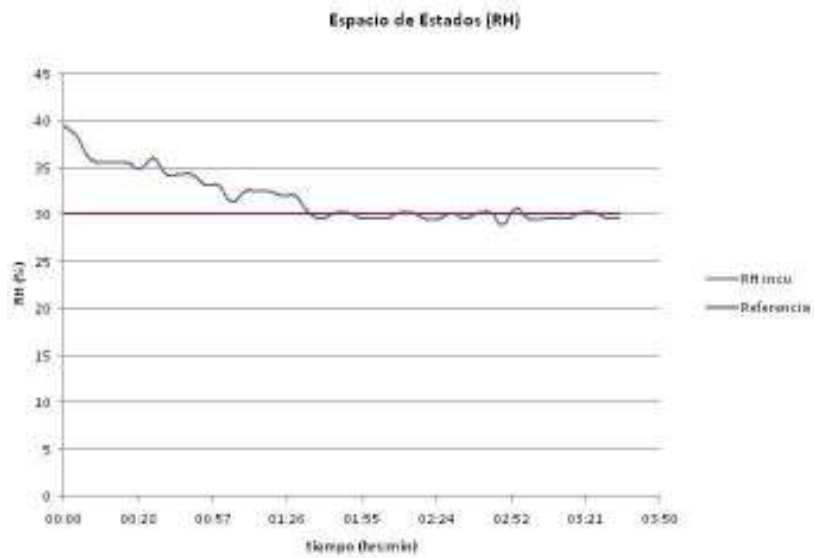


Figura 6.7: Gráfica de la RH en la incubadora utilizando control en el espacio de estados.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

El problema principal de una incubadora es crear un ambiente artificial que emule las condiciones que proporciona una gallina a los huevos. Las variables consideradas en esta tesis son la temperatura y la humedad, de manera que el problema queda acotado a controlar éstas de manera que se logre el nivel deseado tal como se menciona en la sección 1.1, «Objetivo».

Con la construcción del prototipo y los experimentos realizados se pudieron lograr los objetivos planteados. Así, en base a los resultados obtenidos en la sección 6 se puede concluir que un control ON-OFF proporciona una buena respuesta para la aplicación; es decir, llega suficientemente rápido al valor de la referencia, no tiene sobrepaso y mantiene un valor de error lo suficientemente bajo como para cumplir los requerimientos de incubación; sin embargo al utilizar con control más avanzado se tiene una mejor respuesta sacrificando un poco el tiempo de asentamiento; es decir, el tiempo necesario para que la respuesta se acerque a un 95 % del valor de la referencia.

El control PID es un buen ejemplo de lo anterior. Con un error en estado estable mucho menor que los demás controles probados resulta una excelente opción por lo menos en lo que concierne al control de temperatura. Si se intentan controlar ambas variables con un control PID resulta más complicado determinar las ganancias adecuadas para que controle adecuadamente sin que llegue a ser imposible. Aquí el espacio de estados provee una buena solución para resolver este problema, pues básicamente sólo requiere el ajuste de 2 ganancias. Las otras dos, como se vio, resultan despreciables. El control por retroalimentación de estados tiene un valor de error muy pequeño aunque mayor al PID. Tiene la gran desventaja de que cuando el valor está por debajo de la referencia toma mucho tiempo llegar a ese valor (si es posible que lo alcance) o bien, necesita una ganancia muy elevada.

El modelo matemático es novedoso de igual manera y presentó un reto dada la escasa información sobre la *dinámica* de la humedad relativa; mas se consiguió resolver el problema adaptando un modelo para aire acondicionado. La importancia de éste modelo es que proporciona bases para un modelo más cercano a la realidad, recordando que el propuesto es apenas una primera aproximación (ver Sección 7.2).

En cuanto al sistema de volteo, es un sistema novedoso que no se observa en ninguna de las incubadoras consultadas pues utiliza un motor a pasos para accionar el movimiento. El material utilizado (panel de aluminio) tampoco se observó en otras incubadoras. El motor a pasos permite lograr una posición fija de una manera sencilla, razón por la que se eligió. La gran desventaja es que se requiere mayor conocimiento de mecánica o un motor demasiado grande, lo que implica mayor consumo energético. Si bien el sistema propuesto funciona para efectos de ésta tesis, necesita mejorarse para poder implementarse en una prueba biológica (con huevos). (Ver Sección 7.2).

7.1. Ventajas y Desventajas

CONTROL ON-OFF	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Barato	Los componentes mecánicos se desgastan más rápido
Sencillo de manejar	Alto nivel de error
No necesariamente requiere electrónica	Presenta oscilaciones o «brincos» en el estado estable
No requiere conocimientos avanzados	
Alcanza rápidamente el valor de la referencia	

Tabla 7.1: Análisis del Control ON-OFF

CONTROL PID	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Buen seguimiento a la referencia	Forzosamente requiere electrónica
Excelente desempeño como regulador	Se necesitan conocimientos avanzados para su manejo (ganancias)
No presenta oscilaciones en el estado estable	Requiere mayor tiempo de asentamiento y presenta un sobrepaso.
Evita el desgaste mecánico por un <i>switch</i> excesivo	Su costo resulta mayor que el ON-OFF.

Tabla 7.2: Análisis del Control PID

De las tablas se puede concluir que un control ON-OFF es ampliamente utilizado por su bajo costo y fácil manejo; razón por la cuál aún es ampliamente utilizado sobretodo por productores pequeños o incubadoras caseras.

Para trabajos de laboratorio es mejor utilizar controladores más avanzados pues se tendrá un mejor control sobre las variables que influyen en la incubación y por tanto resultados más precisos. El control PID proporciona una buena solución sin que su costo se incremente demasiado; por otra parte, es una opción excelente si se pretende seguir la línea de trabajo en la que se utiliza una charola de agua para proporcionar humedad y se controla la temperatura.

El control en el espacio de estados es una técnica que no es utilizada comercialmente. En las incubadoras analizadas, ninguna contaba con un control de este tipo, pero también resulta una muy buena opción cuando se controlan dos variables simultáneamente. Entender el funcionamiento de este control requiere conocimientos especializados y su manejo no resulta tan sencillo como el control ON-OFF, pues ahora es necesario ajustar 4 ganancias. Aún así, si los actuadores son capaces de responder ante señales de control grandes, este tipo de control proveerá una respuesta muy satisfactoria con un sistema novedoso y cuyo costo no es mayor al del control PID, pues se requiere la misma «infraestructura» cambiando únicamente la lógica del programa.

Se puede observar que la respuesta de éste control no llega completamente a la referencia, lo que justifica perfectamente su comportamiento como control proporcional (P) siendo una de sus características el que presenta error en estado estable.

Utilizar un modelo matemático ayuda a entender el comportamiento de un sistema y puede ayudar

a diseñar un mejor controlador; sin embargo, si éste resulta muy complicado, es mejor considerar al sistema como una caja negra, y manejar las señales que arroja. En el caso de la incubadora, a pesar de que el aparato es sencillo, las ecuaciones que lo gobiernan son difíciles de obtener y de interpretar. Por lo tanto, resulta mejor utilizar un control que se enfoque en llevar el error a cero sin considerar el modelo matemático como tal.

En cuanto al prototipo, se puede mencionar que su diseño se creó para almacenar la información trascendente de incubación que sirve para investigación, para ser completamente automatizado y, hacer más agradable el ambiente de trabajo mediante la comunicación serial (entre el microcontrolador y LabView) para el manejo de otros controladores y la PC, logrando así una incubadora que sea capaz de poder ser controlada mediante diversos controladores y que el usuario pueda ver detalladamente las variables en el interior de la máquina. Por otra parte, se logró que el costo de la incubadora no excediera en tanto a las comerciales.

La tabla 7.4 muestra las ventajas y desventajas del prototipo de incubadora diseñada:

7.2. Trabajo Futuro

A pesar de haberse cumplido los objetivos planteados y con el fin de mejorar el trabajo presentado en esta tesis, se proponen a continuación los objetivos que podrían lograrse a corto, mediano y largo plazo, así como recomendaciones para seguir en un futuro.

Comenzando con el corto plazo, se recomienda la participación de especialistas en el ramo del diseño industrial para mejorar la apariencia y conseguir materiales que sean aislantes más eficientes que la melamina pero sin elevar demasiado el costo; mientras que referente al sistema de volteo, es necesario consultar a especialistas en el área mecánica para eficientar el sistema y lograr mover una carga mayor utilizando un motor pequeño. Posiblemente adaptando una transmisión. En cuanto a la capacidad, sesenta huevos es una muy pequeña para una incubadora, incluso de uso en laboratorio, en consecuencia se debe pensar en aumentar su capacidad por lo menos hasta 250 huevos.

A mediano plazo se debe considerar instalar sensores de dióxido de carbono (CO_2) y de oxígeno (O_2) que deben incorporarse al sistema de adquisición de datos. En una primera etapa instrumentar la incubadora por completo con estos sensores, lo que facilitaría el trabajo en el laboratorio. La segunda etapa sería implementar el control correspondiente para éstas dos importantes variables y de igual manera integrarlo en el sistema para tener el monitoreo y control de temperatura, humedad relativa, oxígeno y dióxido de carbono. Dependiendo de los requerimientos de los experimentos se podría incluir un anemómetro y un control de velocidad del ventilador.

Cabe hacer notar que los sensores y actuadores son bastante caros y en algunos casos (oxígeno) se requiere de los servicios de una empresa externa que proporcione el equipo, por lo que el costo de la incubadora se incrementa notablemente.

En lo concerniente al modelo matemático, el propuesto sirve para dar una idea de la dinámica de la humedad relativa y cómo plantear las ecuaciones diferenciales. Si bien el modelo utilizado aquí se adaptó de [20] como se mencionó en el Capítulo 5, Sección 5.1.3, el modelo propuesto es lineal y utiliza un control lineal de igual manera, mientras que el modelo *base* en [20] es no-lineal y no explican claramente cómo se modeló.

Se requieren estudios más especializados para determinar con mayor exactitud el valor de las constantes de manera que se adecúe más a la realidad.

A largo plazo y enfocándose hacia un uso social de una incubadora, se ha pensado en instalarla en una localidad remota, posiblemente sin acceso a la red eléctrica, por lo que el desafío es olvidar la computadora durante la operación de la incubadora; implementar el control en un microcontrolador y, utilizar alguna fuente alterna de energía, por lo que el consumo de energía de la máquina debe ser muy pequeño. Éste es un objetivo a largo plazo pues requiere de toda una nueva línea de investigación para poder cumplir con este objetivo.

En [8] se presenta parte de la problemática de la producción avícola familiar en donde una incubadora podría ayudar a reducir algunos de los problemas.

CONTROL POR RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Buen seguimiento a la referencia	Se necesitan un modelo matemático para su diseño
Muy bajo error en estado estable	Puede no alcanzar el valor de la referencia
Costo similar al control PID	Se necesitan ganancias muy altas lo que podría amplificar el ruido o saturar los actuadores
No presenta sobrepaso	Requiere mayor tiempo de asentamiento que el control ON-OFF
Se consideran dinámicas que en los otros no	

Tabla 7.3: Análisis del Control por retroalimentación de estados

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se comunica con la PC mediante la comunicación serial.	No es un sistema autónomo, depende de la PC y un software para realizar el control de la incubadora.
Se pueden realizar pruebas con otros diseños de controladores.	Es necesario que el investigador conozca el <i>software</i> y sus opciones.
Se crea un archivo donde se guardan datos de la incubación durante días sin necesidad de preocuparse.	La PC deberá de estar conectada a la corriente eléctrica y a la incubadora desde que comienza la grabación del archivo hasta que se finalice la ejecución del programa.
Programa atractivo para que el usuario pueda modificar las referencias de temperatura y humedad y las gráficas en «tiempo real»	El usuario debe conocer el programa para poder lograr manipularlo adecuadamente.
Se pueden programar diferentes trayectorias de incubación (temperatura y humedad).	Tiene dimensiones grandes debido al diseño, especialmente en largo y ancho.
El sistema de giro permite mantener una posición precisa, además de ser novedoso en su construcción y materiales	Requiere mayor diseño mecánico para hacerlo funcionar con carga.
El modelo matemático proporciona bases para uno mucho más preciso ya que incluye la dinámica de la humedad relativa	Resulta complicado adaptar todas las variables involucradas

Tabla 7.4: Ventajas y desventajas de la incubadora

Apéndice A

Galería de Fotos



Figura A.1: Vista superior del gabinete



Figura A.2: Vista lateral del gabinete



Figura A.3: Detalle del compartimiento de la electrónica en el exterior del gabinete.



Figura A.4: Sistema de humedad



Figura A.5: Sistema de Ventilación



Figura A.6: Sistema de Volteo

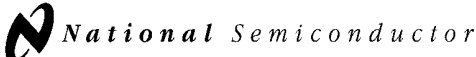


Figura A.7: Circuito del microcontrolador

Apéndice B

Especificaciones de los Sensores y Actuadores utilizados

En las siguientes páginas se muestran las primeras páginas de las hojas de datos que proporcionan los fabricantes de los sensores utilizados así como la del motor a pasos.


November 2000

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

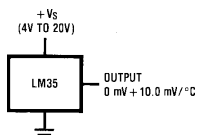
The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^{\circ}\text{C}$ over a full -55 to $+150^{\circ}\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55° to $+150^{\circ}\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40° to $+110^{\circ}\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is available pack-

aged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-220 package.

Features

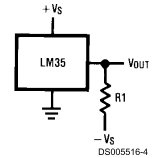
- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at $+25^{\circ}\text{C}$)
- Rated for full -55° to $+150^{\circ}\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^{\circ}\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Typical Applications



DS005516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



DS005516-4

Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$
 $V_{\text{OUT}} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^{\circ}\text{C}$
 $= +250\ \text{mV}$ at $+25^{\circ}\text{C}$
 $= -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

© 2000 National Semiconductor Corporation DS005516
www.national.com

Figura B.1: Sensor de Temperatura LM35

PRODUCT SPECIFICATIONS

HMZ-433A1

HMZ-433A1 Humidity module specifications

1. Application range :

The HMZ-433A1 module consist of an HCZ sensor and integrated circuit to provide a linear DC Voltage for 0-100%RH to enable easy user application of the HCZ sensor. They are specifically designed for use appliances and controllers.

Feature	Application
Wide humidity operation range	Air condition ,humidifier, Dehumidifier.
Linear DC Output	Humidity controller, Humidity transmitter.
Easy operation	Hygrometer, Hygro-recorder.
Long-term stability	Copying machine.
Small and economical	Clock ,Weather-forecast barometer.

2. Electrical characteristics :

2.1 Sensing element (Humidity) : HMZ-433A1 Humidity sensor * GHITRON HCZ sensor

2.2 Supply Voltage(Vin) : 5VDC \pm 5%

2.3 Current Consumption : 5mA max.(2mA avg.)

2.4 Operating Range

Temperature : 0 to 60 $^{\circ}$ C

Humidity : 95%RH or less

2.5 Storage

Temperature : -20 to 70 $^{\circ}$ C

Humidity : 95%RH or less

2.6 Humidity transmitting

Range : 20 to 90%RH

2.7 Accuracy :

Temperature : Resistance(1%) : 50 \pm 0.5K Ω (at 25 \pm 0.2 $^{\circ}$ C)

Humidity : \pm 5%RH (at 25 $^{\circ}$ C , 50%RH, Vin=5.00VDC)

2.8 Humidity Output 0~3.3V

Signal(Reference) : At 25 $^{\circ}$ C , Vin=5.00VDC
(Output Impedance approx:5K Ω)

Humidity(%RH)	20	30	40	50	60	70	80	90
Output Voltage(V)	0.88	0.99	1.32	1.65	1.98	2.31	2.64	2.97

2.9 Temperature Output

Signal(Reference) : Using thermistor 503 R(25 $^{\circ}$ C)=50K Ω \pm 1%,
B(25/85)=3950K \pm 1%

Figura B.2: Sensor de Humedad HMZ-433A1

2-Phase Hybrid Stepping Motor **1.8°**
KH42 series
 HIGH TORQUE, LOW VIBRATION AND LOW NOISE

■ STANDARD SPECIFICATIONS

M O D E L	KH42JM2				
	SINGLE SHAFT	-901	-902	-903	-951
	DOUBLE SHAFT	-911	-912	-913	-961
DRIVE METHOD	————	UNI-POLAR			BI-POLAR
NUMBER OF PHASES	————	2			2
STEP ANGLE	deg./step	1.8			1.8
VOLTAGE	V	3.42	4.4	9.25	4.59
CURRENT	A/PHASE	1.2	0.88	0.5	0.85
WINDING RESISTANCE	Ω/PHASE	2.85	5.5	18.5	5.4
INDUCTANCE	mH/PHASE	2.5	5.1	16.3	9.3
HOLDING TORQUE	mN · m	236	236	236	314
	oz · in	33	33	33	44
DETENT TORQUE	mN · m	14.7	14.7	14.7	14.7
	oz · in	2.1	2.1	2.1	2.1
ROTOR INERTIA	g · cm ²	56	56	56	56
	oz · in ²	0.3	0.3	0.3	0.3
WEIGHTS	g	260	260	260	260
	lb	0.57	0.57	0.57	0.57
INSULATION CLASS	————	JIS Class E (120°C 248° F) (UL VALUE : CLASS B-130°C 266° F)			
INSULATION RESISTANCE	————	500VDC 100MΩmin.			
DIELECTRIC STRENGTH	————	500VAC 50HZ 1min.			
OPERATING TEMP. RANGE	°C	0 to 50			
ALLOWABLE TEMP. RISE	K	70			

■ DIMENSIONS unit = mm (inch)

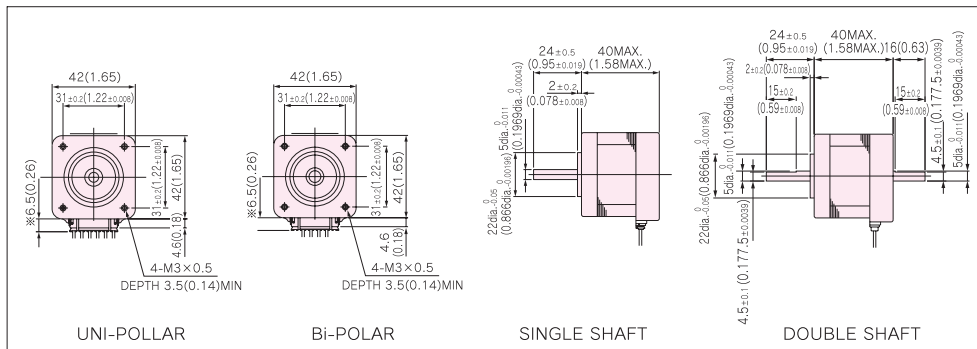


Figura B.3: Motor a Pasos

Apéndice C

Programa del microcontrolador

C.1. Giro del motor a pasos.

A continuación se muestra un extracto del programa del microcontrolador que corresponde a la acción de giro del motor a pasos. Se iniciará con el segmento correspondiente a la tabla 3.1 y la inicialización del bit bandera así como del registro de índice X.

```
PTA equ $00
DDRA equ $04
RAM equ $a1

    MOV #$80,RAM %bit bandera
    MOV #$0F,DDRA

%-----inicialización de la tabla-----%
    MOV #$03,$81
    MOV #$06,$82
    MOV #$0C,$83
    MOV #$09,$84
%-----fin de la tabla-----.%

    MOV #$00,$85 %contador
    MOV #$19,$86 %valor al que tiene que llegar el contador (25 al inicio, 50 posteriormente)
    LDHX #$0081 %registro de índice
```

El corrimiento de la tabla se lleva a cabo de acuerdo al siguiente código.

```
comp BRSET 7,RAM,sigue %determina el sentido de giro

%-----giro a la derecha-----%
    LDA ,X
    STA PTA
    sta $a9
    INCX
    CPX #$85
    BNE cont
```

```

LDX #$81
BRA cont
%-----%

%-----giro a la izquierda-----%
sigue LDA ,X
      STA PTA
      sta $a9
      jsr poncar
DECX
CPX #$80
BNE cont
LDX #$84
BRA cont
%-----%

%-----retardo y contador-----%
cont BSR ret300ms
      bsr ret300ms
      bsr ret300ms
      bsr ret300ms
      LDA $85
      INCA
      STA $85
      CMP $86
      BNE comp
%-----%

```

Una vez que ha finalizado la secuencia, se complementa el bit bandera para que la próxima vez que llegue la instrucción de giro, éste ocurra en sentido contrario.

```

exor LDA #$80
      EOR RAM %complemento del bit bandera
      STA RAM
      MOV #$32,$86 %valor que tiene que alcanzar el contador (50)
      MOV #$00,$85 %reinicio del contador a cero.

```

C.2. Rutina de retardo

La rutina de retardo fue proporcionada por el Mtro. Antonio Salvá Calleja de la Facultad de Ingeniería de la UNAM [7] y se incluye a continuación.

```

ret300ms pshh
pshx
ldhx #$3A97
vuelta: nop
nop
aix #$ff
cphx #$0000

```

```
bne vuelta
pulx
pulh
rts
```

C.3. Programa completo

```
watch equ $1f
ADSCR equ $3c
ADR equ $3d
ADCLK equ $3e
ddra equ $04
pta equ $00
ddrb equ $05
ptb equ $01
ram equ $40
SPDR equ $12
SCC1 equ $13
SCC2 equ $14
SCS1 equ $16
SCS2 equ $17
SCDR equ $18
SCBR equ $19
CONFIG2 equ $1e
tsc equ $20
tmodh equ $23
tmodl equ $24
tisc0 equ $25
tisc1 equ $28
tich0h equ $26
tich0l equ $27
tich1h equ $29
tich1l equ $2a
ddrd equ $07
ptd equ $03

    org $8000
strt: mov #$01,watch
      mov #$00,CONFIG2
      mov #$60,ADCLK
      mov #$00,ram
      mov #$ff,ddra
      mov #$ff,ddrb
      mov #$01,tisc0
      mov #$01,tisc1
      mov #$03,pta

inic: mov #$03,$41
```

```
    mov #$06,$42
    mov #$0c,$43
    mov #$09,$44
    mov #$00,$45
    mov #$19,$46
    ldhx #$0041
    stx $a8

cfgserie:    lda #$30
             sta SCBR
             bset 6,SCC1
             mov #$0C,SCC2
             mov #$00,$A9

leev:  jsr leecar
       lda $A9
       cmp #$6D
       bne nomtr
       jsr stepping
       bra bla

nomtr: cmp #$76
       bne leev

bla:   lda #$40
       sta $a9
       jsr poncar

leet:  jsr leecar
       lda $A9
       cmp #$6D
       bne nomtr1
       jsr stepping

       bra iniconv

nomtr1: cmp #$74
        bne leet

iniconv: mov #$07,ADSCR
checoco: BRCLR 7,$3c,checoco
mandat:  lda #$54
         sta $a9
         jsr poncar
         lda ADR
         sta $a9

mandatmp:      jsr poncar

leee:  jsr leecar
       lda $A9

sinmtr: cmp #$65
        bne leee
```

C.3. PROGRAMA COMPLETO

83

```
inicconv: mov #$05,ADSCR
checoco2: BRCLR 7,$3c,checoco2
mandaE:  lda #$45
         sta $a9
         jsr poncar
         lda ADR
         sta $a9
mandaentr:      jsr poncar

lees:  jsr leecar
      lda $A9
sintr1: cmp #$73
      bne leet

inicconv1: mov #$04,ADSCR
checoco3: BRCLR 7,$3c,checoco3
mandaS:  lda #$53
         sta $a9
         jsr poncar
         lda ADR
         sta $a9
mandasal:      jsr poncar

leer:      jsr leecar
         lda $a9
nomtr2:    cmp #$72
         bne leer

bla2: mov #$06,ADSCR
checoco1: BRCLR 7,$3c,checoco1
mandar:  lda #$52
         sta $a9
         jsr poncar
otro:    lda $3d
         sta $a9
         jsr poncar

ctrl: jsr leecar
      lda $a9
      sta pta

leef:      jsr leecar
         lda $a9
nomtr3:    cmp #$66
         bne leef
bla3:  jmp leet

stepping: ldhx #$0000
```

```

        ldx $a8
comp:   BRSET 7,$40,sigue
        LDA ,X
        STA ptb
        INCX
        CPX #$45
        BNE cont
        LDX #$41
        BRA cont
sigue:  LDA ,X
        STA ptb
        DECX
        CPX #$40
        BNE cont
        LDX #$44
        BRA cont
        BSR ret300ms
        bsr ret300ms
        bsr ret300ms
cont:   bsr ret300ms
        LDA $45
        INCA
        STA $45
        CMP $46
        BNE comp
exor:  LDA #$80
        EOR $40
        STA $40
        MOV #$32,$46
        MOV #$00,$45
        stx $a8
        rts

ret300ms pshh
pshx
ldhx #$3A97
vuelta: nop
nop
aix #$ff
cphx #$0000
bne vuelta
pulx
pulh
rts

poncar: lda SCS1
        MOV $a9,SCDR
chescte: brclr 7,SCS1,chescte
        rts

```

```
leecar: brclr 5,SCS1,leecar
        lda SCS1
        lda SCDR
        sta $A9
        rts

        org $d7fe
        dw strt
```


Bibliografía y Referencias

- [1] Gqf manufacturing. <https://www.gqfmg.com/store/front.asp>.
- [2] Gráfico psicrométrico temperaturas normales presión atmosférica 77.100 kpa. altura 2250 m. <http://www.fao.org/docrep/x5027s/x5027SAH.GIF>.
- [3] Hmz-4331 humidity module specifications. *AG Electrónica*.
- [4] Incubadoras horus. <http://www.incubadorashorus.com.ar/index.html>.
- [5] Incubadoras obsar. <http://www.obsar.com.ar/PaginaControladoresPID.php>.
- [6] Ni labview - improving the productivity of engineers and scientists. www.ni.com.
- [7] Antonio Salvá Calleja. Aida08 ambiente integrado para desarrollo y aprendizaje con microcontroladores de la familia 68hc908 de freescale (guía básica de usuario). <http://dctrl.fi-b.unam.mx/salva/guaidab.pdf>, 2008.
- [8] Sinai Betsabé Centeno Bautista *et al.* Producción avícola familiar en una comunidad del municipio de ixtacamaxtitlán, puebla. 2007.
- [9] Facilísimo.com. Cómo hacer una incubadora casera para aves de corral. http://mascotas.facilisimo.com/reportajes/aves/como-hacer-una-incubadora-casera-para-aves-de-corral_86050.html.
- [10] N.A. FRENCH. Modelling incubation temperature: The effects of incubator design , embryonic development, and egg size. *Poultry Science*, 1997.
- [11] Leon R. Glicksman. Air water mixtures: Psychrometrics. http://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-42j-fundamentals-of-energy-in-buildings-fall-2008/readings/MIT442JF08_a%20ir%20ater.pdf, 2010.
- [12] Universal Industrial Gases Inc. Psychrometric calculator, properties of air. <http://www.uigi.com/WebPsychH.html>.
- [13] National Instruments. Lm35 precision centigrade sensors. www.national.com, 2000.
- [14] National Instruments. TL082 wide bandwidth dual jfet input operational amplifier. www.national.com, 2000.
- [15] MOTOROLA. M68hc08 microcontrollers. <http://dctrl.fi-b.unam.mx/salva/MC68HC908GP32.pdf>, 2002.
- [16] Actualidades México. Estudiantes politécnicos construyen incubadora avícola automatizada. <http://www.actualidadesmexico.com.mx/2011/01/estudiantes-politecnicos-construyen-incubadora-avicola-automatizada/>, 2011.

- [17] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering*. Pearson Education, EUA: Pearson Education 2003.
- [18] John Portsmouth (rev.) (trad. Ing. José Luis de la Loma). *Avicultura práctica. 6a ed.* 1989.
- [19] José Antonio Quintana. *Avitecnia: Manejo de las aves domésticas más comunes. 3a ed.* Trillas, México: Trillas 1999 (reimp. 2003).
- [20] Vélez-Reyes Miguel Rentel-Gómez, Carlos. Decoupled control of temperature and relative humidity using a variable-air-volume hvac system and non-interacting control. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications*, 2001.
- [21] José de Jesús Rubio *et al.* Modeling of the relative humidity and control of the temperature for a bird incubator. *Advances in Computational Intelligence*, 2009.
- [22] José de Jesús Rubio *et al.* Relative humidity modeled by a functional network. 2010.