

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**CONTROL DE TEMPERATURA PARA LA BURBUJA
NEONATAL MODELO 3B**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

Fredy Pillaca Garaundo

Asesor: Msc. Bruno Castellón Lévano

Lima – Febrero del 2011

RESUMEN

La necesidad de controlar la temperatura del habitáculo del prototipo de Burbuja Neonatal Modelo 3B (prototipo para realizar ensayos preclínicos) desarrollado en nuestra universidad, motivó la ejecución del presente trabajo de tesis, que consistió en diseñar e implementar el control de temperatura del habitáculo del prototipo mencionado en el rango de 25°C a 37°C, con un tiempo de calentamiento menor a 90 minutos y una precisión de estabilidad térmica menor a ± 0.5 °C, según norma IEC 60601-2-19.

El diseño e implementación del control se dividieron en dos fases.

En la primera fase, se realizó el control de temperatura en 4 etapas (estudio de la planta de la Burbuja Neonatal 3B; obtención de los parámetros del controlador PID; diseño e implementación del algoritmo de control en el PLC EASY 821-DC-TCX; verificación y reajuste del control de temperatura). Además en el proceso de mejorar la sintonización se encontró problemas de la electrónica.

En la segunda fase, se realizó una reingeniería de la planta: se diseñó e implementó el subsistema electrónico de la Burbuja Artificial Neonatal modelo 3B. Donde el algoritmo de control final posee 2 tipos de controles (P, PID), en un primer momento actúa el controlador proporcional ($P=4$) y luego actúa el controlador PID ($P=2.5$; $I=2500$; $D=120$); esto con el fin reducir el tiempo de subida y obtener una mejor respuesta.

Finalmente el resultado posee una estabilidad térmica de ± 0.08 °C y un tiempo de calentamiento de 63.2 minuto. De esta manera es posible cumplir con los requerimientos de control de temperatura según la norma mencionada.

Los resultados son muy importantes, pues permitirá a médicos neonatólogos realizar ensayos preclínicos.

Gracias Dios
por ser quien ha estado
a mi lado en todo momento, gracias
por darme una familia maravillosa,
gracias por cuidar de ellos,
gracias por todo
Señor.

Dedico este trabajo a mi familia en especial a mis padres, Genaro Pillaca y Rosalía Garaundo ya que gracias a ellos soy quien soy hoy en día, fueron los que me dieron ese cariño y calor humano necesario, son los que han velado por mi salud, mis estudios, mi educación, alimentación, entre otros, son a ellos a quien les debo todo, hora de consejos, de regaños, de tristezas y alegrías de las cuales estoy muy seguro que las han hecho con todo el amor del mundo para formarme como un ser integral y de las cuales me siento extremadamente orgulloso.

A mis hermanos: Dona, Nelly, Karina, Marleni, Wilfredo y Zulma les agradezco por estar a mi lado, por apoyarme, por consentirme, gracias por compartir una etapa de su vida conmigo. A mis sobrinos: Abel, Cristhian, Klara, Minerva, José, Jimena y Sebastián los quiero mucho sobrinos, más que mis sobrinos son como mis hermanos menores. A mis cuñados: Richard, Walter, **Armando**, Carlos y Ismael los quiero mucho.

Agradecimientos:

Un agradecimiento especial para Patty, gracias por ofrecerme tu total confianza y por darme tu apoyo en las buenas y en las malas. Para mi amigo y asesor Bruno Castillón por hacer posible esta tesis. A todos mi amigos de GIDEMS: Edwin, Matías, Arlon, Anita y Carol; por compartir momentos conmigo. A Jorge por brindarme una amistad de hermandad, a José por brindarme una amistad sincera. A mis compañeros quienes me acompañaron en esta etapa de aprendizaje y conocimientos. A mis profesores quienes me han forjado como un profesional en esta etapa universitaria. Y a todas las personas que se cruzaron en este camino y que me dieron palabras de aliento y apoyo. ¡GRACIAS!

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Introducción	2
1.2 Justificación	2
1.3 Antecedentes.....	3
1.4 Estado del arte.....	3
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 Objetivo general.....	4
1.5.2 Objetivos específicos	4
2 MARCO CONCEPTUAL.....	5
2.1 Neonatos	5
2.2 Incubadoras	5
2.2.1 Burbuja Artificial Neonatal (BAN)	5
2.2.2 Burbuja Artificial Neonatal Modelo 3B	5
2.3 Temperatura	6
2.4 Sistema de control de procesos	6
2.4.1 Controladores Proporcionales-Integrales-Derivativos (PID)	7
2.4.2 Implementación digital	7
2.5 Requerimientos de control de temperatura según norma IEC60601	7
2.5.1 PLC EASY 821-DC-TCX de MOELLER	8

2.5.2	PLC MFD-80-B+AC-CP8-ME de MOELLER	10
2.5.3	Programación del PLC de Moeller.....	10
3	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL	11
3.1	FASE 1	12
3.1.1	Estudio de la planta de la burbuja neonatal modelo 3B.....	12
3.1.2	Obtención de los parámetros del controlador PID	15
3.1.3	Diseño e implementación del algoritmo de control	18
3.1.4	Ensayos y reajuste fase 1	26
3.2	FASE 2: REINGENIERIA DE LA BURBUJA NEONATAL 3B	33
3.2.1	Diseño e implementación del subsistema electrónico	33
3.2.2	Obtención de los parámetros del controlador PID	51
3.2.3	Diseño e implementación del algoritmo de control	54
3.2.4	Ensayos y reajuste fase 2	57
4	RESULTADOS	67
	CONCLUSIONES.....	73
	RECOMENDACIONES.....	74
	BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Burbuja Artificial Neonatal Modelo 3B [7]	6
Figura 2.2 Descripción de norma IEC 60601-2-19 temperaturas vs tiempo [28].....	8
Figura 2.3 PLC EASY 821-DC-TCX de Moeller [27]	9
Figura 2.4 PLC EASY MFD-80-B de Moeller [27].....	10
Figura 3.1 Diagrama general del control de temperatura.	11
Figura 3.2 Habitáculo de la Burbuja Neonatal modelo 3B	12
Figura 3.3 PLC EASY 821-DC-TCX interactuando con el PLC MFD-80-B [27].	13
Figura 3.4 Diagrama de bloque del módulo adquisición de control [31]	13
Figura 3.5 Diagrama de bloque etapa actuador [31]	14
Figura 3.6 Evaluación de temperatura con el “sistema electrónico que permite medir y evaluar la distribución de temperaturas en incubadoras neonatales”	14
Figura 3.7 Comportamiento inicial de la temperatura de la Burbuja Neonatal 3B....	15
Figura 3.8 Etapas para obtener los parámetros del modelo del proceso y del controlador.....	15
Figura 3.9 Curva de reacción y entrada escalón.....	16
Figura 3.10 Curva de reacción y método de la tangente de Ziegler y Nichols	17
Figura 3.11 Diagrama de bloques general del algoritmo de control de temperatura	19
Figura 3.12 Interfaz gráfica del programa EASY-SOFT mostrando en diagrama ladder el algoritmo de procesamientos de datos sensados.....	22
Figura 3.13 Interfaz gráfica del módulo escalado de valores, donde se muestra el escalamiento de los datos sensados	22
Figura 3.14 Interfaz del módulo escalado de valores, mostrando el escalamiento de datos programados.....	23

Figura 3.15 Interfaz módulo PID, mostrando los parámetros del controlador	23
Figura 3.16 Elección de período de muestreo.....	24
Figura 3.17 Interfaz modulación por ancho de pulso, mostrando los valores configurados	25
Figura 3.18 Elección del ciclo de duración para el PWM casos presentados para una duración de periodo de 8.3 ms y 2000 ms	25
Figura 3.19 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, primer ensayo PID.....	26
Figura 3.20 Gráfica mostrando la estrategia de control de temperatura	27
Figura 3.21 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, prueba control ON/OFF	27
Figura 3.22 Interfaz gráfica del programa EASY-SOFT mostrando en diagrama ladder el algoritmo de la estrategia de control: variando la ganancia proporcional..	28
Figura 3.23 Gráfica variación de temperatura en el tiempo mostrando el resultado de la estrategia de control, resultado paso 2.....	29
Figura 3.24 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, resultados del control proporcional puro.....	30
Figura 3.25 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, resultado del control proporcional integral	30
Figura 3.26 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, mostrando el resultado del control PID del paso 3.....	31
Figura 3.27 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, mostrando el resultado del controlador PID final de la fase 1	32
Figura 3.28 Diagrama de bloques de la reingeniería del subsistema electrónico de la BAN-3B	34
Figura 3.29 Diagrama de bloques de la reingeniería del módulo de adquisición	36
Figura 3.30 Diagrama esquemático del acondicionamiento del sensor de temperatura	37

Figura 3.31 Diagrama esquemático del puente wheastone del acondicionamiento de temperatura	37
Figura 3.32. Diagrama esquemático del circuito amplificador de señal de temperatura, INA122	39
Figura 3.33 Gráfica variación de temperatura en el tiempo del circuito de acondicionamiento del sensor de temperatura.....	40
Figura 3.34 Esquemático del acondicionamiento del sensor de temperatura seguridad.....	41
Figura 3.35 Configuración de comparador de histéresis mostrando las fórmulas para hallar las resistencias de la configuración histéresis [35].	42
Figura 3.36 Esquemático implementado para la seguridad de temperatura.....	43
Figura 3.37 Esquemático implementado para la simulación de la seguridad de temperatura, histéresis en el programa Proteus V.7.5	43
Figura 3.38 Resultado de la simulación de histéresis en el osciloscopio digital de Proteus V.7.5.....	44
Figura 3.39 Esquemático implementado para la mezcla de gases.....	45
Figura 3.40 Gráfica ganancia y fase v.s frecuencia, resultados de la simulación del filtro activo pasabajos en el programa FilterPro.	45
Figura 3.41 Diagrama de bloques del módulo de potencia	46
Figura 3.42 Esquemático del acondicionamiento del calefactor	47
Figura 3.43 Esquemático del acondicionamiento del compresor.....	48
Figura 3.44 Esquemático del acondicionamiento del ventilador	48
Figura 3.45 Esquemático de la reingeniería del subsistema electrónico diseñado para la BAN-3B.....	50
Figura 3.46 Board de la reingeniería del subsistema electrónico diseñado para la BAN-3B	51

Figura 3.47 Tarjeta electrónica de la reingeniería del subsistema electrónico implementada para la BAN-3B.....	51
Figura 3.48 Curva de reacción de la prueba de lazo abierto de la fase 2.....	52
Figura 3.49 Interfaz gráfica de la aplicación Sistemas de Identificación de Matlab .52	
Figura 3.50 Curvas de simulación de los modelos matemáticos aproximados de la planta.....	53
Figura 3.51 Modelo matemático de tres polos más tiempo muerto brindados por MATLAB.	53
Figura 3.52 Curva de reacción fase dos identificando el método de la tangente de Zigler y Nichols	54
Figura 3.53 Diagrama de bloques general del algoritmo de control fase 2.	55
Figura 3.54 Diagrama de bloques en simulink de la planta, fase 2	58
Figura 3.55 Diagrama de bloques en simulink para el controlador PID ideal.....	58
Figura 3.56 Diagrama de bloques en simulink de la planta BAN-3B	58
Figura 3.57 Resultados de control proporcional, con ganancia 4	59
Figura 3.58 Resultados de control proporcional, con ganancia 2.5	59
Figura 3.59 Resultados del control PI, $P=2.5$ y $I=400$	60
Figura 3.60 Estrategia de control de fusionar 2 controladores	61
Figura 3.61 Diagrama de simulación, bloques, con la estrategia de usar 2 controladores.....	61
Figura 3.62 Resultados del control PI, $P=2.5$ y $I=400$, con la estrategia de control .62	
Figura 3.63 Resultados del control PID, $P=2.5$, $I=4000$, $D=400$	62
Figura 3.64 Resultados del control PID, $P=2.5$, $I=3000$ y $D=400$	63
Figura 3.65 Resultados del control PID, $P=2.5$, $I=2500$	64
Figura 3.66 Resultados del control PID, $P=2.5$, $I=3000$ y $D=50$	64

Figura 3.67 Resultados del control PID, $P=2.5$, $I=3000$ y $D=120$	65
Figura 3.68 Resultados del controlador final para 2 setpoint distintos.....	65
Figura 3.69 Sensores calibrándose con el patrón Ertco-Eutechnics. 4400 con resolución de 0.01°C y una precisión de $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$	66
Figura 3.70 Interfaz gráfica de un sistema electrónico que permite medir y evaluar la distribución de temperaturas en incubadoras neonatales [37], comprobando la curvas temperatura vs tiempo.....	66
Figura 4.1: Respuesta del control de temperatura de la fase 1 brindado por nuestro sensor de control.	67
Figura 4.2 Resultado final del control de temperatura brindado por nuestro sensor de control.....	68
Figura 4.3 Respuesta final del control de temperatura considerando referencia de 28°C	69
Figura 4.4 Respuesta final del control de temperatura considerando referencia de 33°C	69
Figura 4.5 Respuesta final del control de temperatura para distintos setpoint.....	70
Figura 4.6 Interfaz gráfica de un sistema electrónico que permite medir y evaluar la distribución de temperaturas en incubadoras neonatales [37], verificando la curva del control de temperatura para distintos setpoint.....	70
Figura 4.7 Diseño del subsistema electrónico para la BAN-3B	71
Figura 4.8 Tarjeta electrónica de la Burbuja Neonatal 3B, interactuando con sus sensores y actuadores.....	72
Figura 4.9 Curva temperatura vs tiempo verificando la seguridad del control de temperatura	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Sintonización por el método de Ziegler y Nichols para la fase 1.....	17
Tabla 3.2 Valores del rango lineal de la ecuación temperatura vs valor digital del ADC de la fase 1.....	21
Tabla 3.3 Períodos de muestreo para distintas variables.....	24
Tabla 3.4 Sensores mostrando sus características resaltantes para el módulo de adquisición.....	35
Tabla 3.5 Actuadores mostrando sus características resaltantes para el módulo de potencia.....	45
Tabla 3.6 Valores del rango lineal de la ecuación temperatura vs valor digital del ADC de la fase 2.....	56

INTRODUCCIÓN

La burbuja neonatal modelo 3B (equipo médico para la atención de neonatos críticos) que se desarrolló en la Pontificia Universidad Católica del Perú (2008-2009) basado en la patente de invención US6884211B2, posee un control de temperatura incipiente, debido a su inestabilidad; por consiguiente aún no se puede utilizar en seres vivos; razón por la cual este trabajo de tesis tiene como objetivo diseñar e implementar el control de temperatura para la burbuja neonatal 3B donde al programarse la temperatura en un rango de 25°C a 37 °C, debe lograrse un tiempo de calentamiento menor a 90 minutos y una precisión de estabilidad térmica menor a +/- 0.5 °C según la norma IEC 60601-2-19 sección ocho ítem 50, apartados 101 Y 108.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Introducción

El prototipo del control implementado en la planta BAN-3B (Burbuja Artificial Neonatal modelo 3B) no es confiable, por su carencia de robustez, imprecisión y largo tiempo de calentamiento; Por lo tanto se puede considerar que es un control incipiente.

El control de temperatura implementado puede originar errores, y en caso extremo nos llevaría a un exceso de calor, que a su vez puede causar hipertermia en los prematuros; por consiguiente hemorragia intracraneana. Por el otro extremo podría causar pérdida de calor causando hipotermia del neonato; la cual está asociada a la dificultad respiratoria, dificultad para alimentarse, hipoglucemia y acidosis, estos signos son más sutiles, pero sus efectos más graves como la incidencia de enterocolitis necrotizante y con un aumento de la presión en la arteria pulmonar [1] [2] [3] [4].

1.2 Justificación

En el Perú, el grupo de investigación de equipos médicos y sistemas (GIDEMS) el cual pertenece a la Sección de Electricidad y Electrónica de la Pontificia Universidad Católica del Perú, viene realizando desde 1993 investigaciones y tratamiento de nuevos sistemas de control, ventilación, calefacción, así como la construcción de incubadoras. En consecuencia, surge la necesidad de un control de temperatura en la versión de incubadora neonatal denominada BAN-3B.

Este trabajo de tesis es importante, porque existe una relación clara entre el control de la temperatura y la mortalidad neonatal. En una serie de ensayos controlados, demostraron que el mantenimiento de los bebés en incubadoras calientes dio lugar una reducción en la mortalidad del 25% [5] [6].

1.3 Antecedentes

GIDEMS nace en 1993 para mejorar la calidad de vida de los neonatos de alto riesgo mediante la aplicación de la ingeniería en el desarrollo de equipos de alta tecnología. Desde su inicio GIDEMS ha sido una organización multidisciplinaria, agrupando ingenierías, áreas médicas y diseño industrial. El esfuerzo conjunto le ha permitido crear soluciones en el ámbito científico, técnico y organizacional; optimizar recursos económicos y humanos e incorporar sistemas y elementos con tecnología propia [7].

El grupo GIDEMS ha venido trabajando por más de una década y durante su trayecto ha desarrollado equipos médicos con tecnología propia en el área de Ingeniería Neonatal. La tecnología desarrollada le ha permitido diseñar patentes reconocidas a nivel mundial (patente de invención EP1380276 [8], US6884211B2 [9]).

A finales del año 1994 se culmina el desarrollo del primer prototipo de incubadora con un control digital de temperatura, tipo ON/OFF con un error en estado estable de ± 0.30 °C [10].

Entre 1995-1999 se empieza a desarrollar un segundo prototipo de incubadora, este genera condiciones

apropiadas de temperatura (rango programable entre de 20°C a 40°C) utilizaron un controlador digital de temperatura, tipo proporcional integral con un error en estado estable de ± 0.18 °C [11].

(2001-2006) La Burbuja Artificial Neonatal controla (BAN), predecesor de la BAN-3B; posee algoritmos de control para los parámetros ambientales tales como: temperatura, flujo de la mezcla aire-oxígeno y concentración de oxígeno. En cuanto al control de los parámetros de temperatura, se empleó una estrategia de control proporcional, se obtuvo un error en estado estable de ± 0.13 °C [12].

1.4 Estado del arte

En Estados Unidos se inventa el aparato que sirve para analizar las muestras biológicas en respuesta a la radiación de microondas, en ella para realizar el proceso de muestreo y análisis se debe mantener a una temperatura de 20°C con una precisión de $\pm 0,1$ °C, para ello usan el controlador PID [13].

En la invención de la patente de un aparato de decisiones y almacenamiento de yogurt con tecnología térmica. En el proceso de la incubación, la máquina debe mantener temperatura a 42°C a través de PID, de modo que la temperatura del aire no se vea afectada por la temperatura del exterior [14].

En la actualidad, el manejo de muestras biológicas destinadas a la experimentación y el análisis de diagnóstico es a menudo limitado por la necesidad de manejar con cuidado las condiciones de la perfusión y la incubación; ante ello existe la invención de una incubadora de cultivo biológico, donde comúnmente se debe mantener la temperatura $37 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ en respuesta a los cambios de temperatura del ambiente, el autoajuste se realiza por un conjunto de óptimas constantes (proporcional, integral y diferencial) [15].

La Burbuja Neonatal Artificial, modelo del cual se parte para la Burbuja Neonatal modelo 3B, se empleó una estrategia de control proporcional, obteniéndose un error en estado estable de $\pm 0.13^{\circ}\text{C}$ [12].

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un control de temperatura para Burbuja Neonatal modelo 3B.

1.5.2 Objetivos específicos

- ❖ Diseñar el control de temperatura
- ❖ Implementar el control de temperatura
- ❖ Verificar que el control de temperatura cumpla con la norma de la IEC 60601, tiempo de calentamiento menor a 90 minutos y una precisión de estabilidad térmica menor a $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (IEC 60601-2-19 sección ocho ítem 50, apartados 101 y 108).

CAPÍTULO 2

MARCO CONCEPTUAL

2.1 Neonatos

Un neonato es un recién nacido de 4 o menos semanas. El período inicial del neonato es un tiempo importante porque, en esta ocurren cambios muy rápidos que repercutirán en el resto de vida de la persona.

La edad gestacional con que nace el neonato puede llegar a tener consecuencias mortales. Se considera que la mortalidad del neonato es directamente proporcional a la edad gestacional [16].

2.2 Incubadoras

Las incubadoras son aparatos diseñados para producir las condiciones ambientales apropiadas específicas y usadas durante el cuidado de neonatos de alto riesgo, ya que cuando el neonato está sujeto a condiciones ambientales no controladas, su temperatura corporal tiende a descender a causa de la inmadurez de su sistema nervioso termo regulatorio. [17] [18]. En los neonatos la pérdida de temperatura es mucho mayor en el neonato prematuro, por ejemplo a las 26 semanas con 1 día de edad un prematuro pierde más de 50 Kcal/kg en comparación con 10 días de edad, quien pierde menos de 5 Kcal/kg [19].

2.2.1 Burbuja Artificial Neonatal (BAN)

Este equipo brinda a un neonato un ambiente aséptico y con parámetros ambientales controlados. Está demostrado que posee mejores características técnicas funcionales que las incubadoras convencionales [8].

2.2.2 Burbuja Artificial Neonatal Modelo 3B

Prototipo en ejecución, versión posterior a la BAN. Este prototipo está dirigido hacia la sierra peruana por consiguiente posee un diseño distinto a la BAN [20].



Figura 2.1 Burbuja Artificial Neonatal Modelo 3B [7]

2.3 Temperatura

La temperatura es una propiedad termodinámica muy utilizada, pero difícil de definir. Por lo regular se asocia con la actividad molecular del sistema [21]. o se define como la magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente [22].

La temperatura ideal para el tratamiento de los recién nacidos prematuros es de 34 °C. Sin embargo, esta temperatura ideal es difícil de mantener debido a las pérdidas de calor dentro de la incubadora, así como a factores físicos y geométrico-espaciales que impiden mantener una temperatura uniforme y estable dentro de la cápsula donde se aloja al recién nacido [23].

2.4 Sistema de control de procesos

Un sistema de regulación en la que la salida es una variable como presión, temperatura, humedad, flujo, nivel de líquido, etc. se le denomina sistema de control de proceso [24]. De aquí se puede extraer que el control de temperatura es un sistema de regulación que tiene como salida la temperatura.

Los controladores se clasifican de acuerdo a sus acciones de control, y la más conocida de estas son los controladores: proporcionales – integrales – derivativos. [24].

2.4.1 Controladores Proporcionales-Integrales-Derivativos (PID)

Los controladores PID son los más utilizados (se estima que al menos un 90% de los reguladores empleados en la industria son PID's o variantes del mismo) [25]. Este tipo de controladores no se ha visto desplazado por los modernos algoritmos de control fruto del desarrollo de las áreas de electrónica e informática. Su amplio uso radica en las dos grandes ventajas que proporcionan estos controladores, como la robustez y las intuitivas relaciones entre sus parámetros y la respuesta del sistema [26].

La prueba más clara de la eficacia de los controladores PID es que la mayoría de los fabricantes están dotando a los reguladores industriales de ajustes de los parámetros del PID. Como es el caso del PLC Moeller modelo EASY821-DC-TCX, que tenemos en la BAN-3B [27].

2.4.2 Implementación digital

En la actualidad es común la implementación de controladores PID usando microprocesadores. Los aspectos más importantes a considerar son el periodo de muestreo y la discretización.

2.5 Requerimientos de control de temperatura según norma IEC60601

La norma internacional IEC 60601 establece rangos de funcionamiento y exigencias para el desarrollo de equipos médicos. El apartado IEC 60601-2-19 está referido a la seguridad en incubadoras neonatales. A continuación se hace referencia a los requerimientos térmicos de la norma antes mencionada [28] [29].

- ❖ Sección dos.- Requerimientos de seguridad: La temperatura ambiental donde operará la incubadora debe estar entre +20°C y +30°C.
- ❖ Sección ocho apartado 101.- En condición de temperatura estabilizada la temperatura de la incubadora no diferirá de la temperatura media de la incubadora en más de 0.5°C.
- ❖ Sección ocho apartado 108.- El tiempo de calentamiento del equipo no excederá el 20% del tiempo de calentamiento especificado en las instrucciones. Se verificará mediante la siguiente prueba: con el control de temperatura fijado a 12°C por encima de la temperatura ambiental, se

encenderá empezando desde una condición fría. Se medirá el tiempo que demore en alcanzar 11°C por encima de la temperatura ambiental (figura 2.2).

- ❖ Sección diez apartado 10.- Para una incubadora regulada por aire, el rango del mando de temperatura deberá ir de 30°C o menos hasta no más de 37°C .

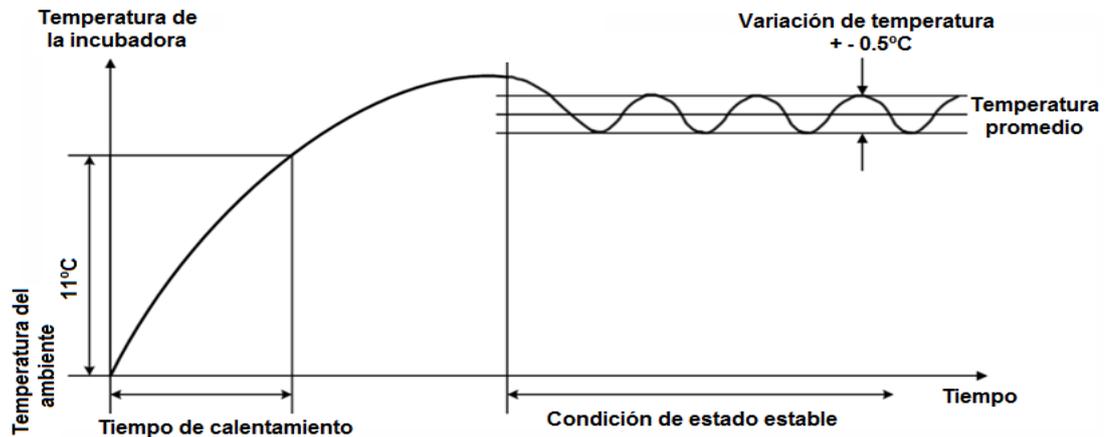


Figura 2.2 Descripción de norma IEC 60601-2-19 temperaturas vs tiempo [28]

2.5.1 PLC EASY 821-DC-TCX de MOELLER

Es un controlador lógico programable PLC, esta cualidad permite que el equipo pueda ser utilizado en una gran diversidad de procesos de ingeniería, ofreciendo a la industria flexibilidad y adaptabilidad a los cambios [30].

Easy821 posee: Lógica, temporizador, contador, interruptor de tiempo y las funciones aritméticas. El easy821 puede realizar muchas tareas en las áreas de ingeniería.

Proporcionan funciones utilizadas en los sistemas de control basados en elementos tradicionales del tipo de contactores y relés. También permiten el procesamiento de señales analógicas; por otro lado, posee bloques funcionales tales como la comparación, PID, PWM, escalonamiento de valores (LS), etc. Una deficiencia de este controlador a comparación con otros del mismo fabricante es que no posee interfaz de usuario (teclado y LCD) [27].



Figura 2.3 PLC EASY 821-DC-TCX de Moeller [27]

2.5.1.1 Bloque PID

El controlador PID trabaja sobre la base del algoritmo PID. Según esto, la variable manipulada $Y(t)$ es el resultado del cálculo del componente proporcional, componente derivativo y la componente integral.

$$Y(t) = YP(t) + YI(t) + YD(t)$$

$Y(t)$ = Valor de la componente proporcional

$YP(t)$ = Valor de la componente proporcional

$YI(t)$ = Valor de la componente integral

$YD(t)$ = Valor de la componente derivativo

A) Componente proporcional

$$YP(t) = K_p \times [X_s(t) - X_i(t)]$$

K_p = Ganancia proporcional

$X_s(t)$ = Valor de ajuste (temperatura programada)

$X_i(t)$ = Valor real (temperatura sensada)

B) Componente integral

$$YI(t) = K_p \times T_c/T_n \times [X_s(t) - X_i(t)] + YI(t-1)$$

K_p = Ganancia proporcional

T_c = Tiempo de exploración

T_n = Tiempo de integración (también conocido como tiempo de reposición)

$X_s(t)$ = Valor de ajuste (temperatura programada)

$X_i(t)$ = Valor real (temperatura sensada)

$YI(t-1)$ = Valor de la componente integral en el tiempo $t-1$

C) Componente diferencial

$$YD(t) = K_p \times T_v/T_c \times (X_i(t-1) - X_i(t))$$

K_p = Ganancia proporcional

T_c = Tiempo de exploración

T_v = Tiempo diferencial del sistema de control (también llamado la tasa de tiempo)

$X_i(t)$ = Valor real (temperatura sensada)

$X_i(t-1)$ = Valor real en el tiempo $t-1$ (temperatura sensada)

2.5.2 PLC MFD-80-B+AC-CP8-ME de MOELLER

El aparato MFD dispone de un display LCD y una resolución de 132x64 píxeles con iluminación de fondo. Además, también posee dos LEDs de tapa frontal y nueve teclas de función. Se puede dar la aplicación como aparato de visualización, en la cual se crean conexiones entre la pantalla de visualización y el programa, para así representar cambios en el proceso o realizarlos mediante entradas del usuario [27].



Figura 2.4 PLC EASY MFD-80-B de Moeller [27]

2.5.3 Programación del PLC de Moeller

Los programas necesarios para programar el PLC EASY 821-DC_TCX y PLC MFD-80-B son: EASY-SOFT y EASY-SOFT PRO propiedad de Moeller. Estos programas son diseñados para un PC con una plataforma Windows 2000 a partir de SP4, Windows XP a partir de SP1 o superior [27]. Los requisitos mínimos del sistema una velocidad de procesador mayor a 600MHz, memoria RAM mayor a 128 MB, memoria disco duro mínimo de 80MB y una resolución de pantalla mínima de 1024x768 [27].

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL

Introducción

Este trabajo de tesis consiste en controlar la temperatura del habitáculo neonatal de la Burbuja Neonatal 3B mediante un PLC, con un lazo realimentado conformado por: una etapa de sensado de temperatura, un controlador digital (PLC) y una resistencia calefactora.

Se utilizó el algoritmo PID para lograr que la variable controlada del proceso cumpla con las especificaciones de los usuarios.

En este capítulo, el diseño e implementación del control se dividieron en dos fases:

En la primera fase, se realizó el control de temperatura en 4 etapas (estudio de la planta de la Burbuja Neonatal 3B; obtención de los parámetros del controlador PID; diseño e implementación del algoritmo de control en el PLC EASY 821-DC-TCX; verificación y reajuste del control de temperatura).

En la segunda fase, se realizó una reingeniería de la planta: se diseñó e implementó el subsistema electrónico de la Burbuja Artificial Neonatal modelo 3B, lo cual conlleva a una variación de la planta y un nuevo control de temperatura.

En la figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques general del control de temperatura.

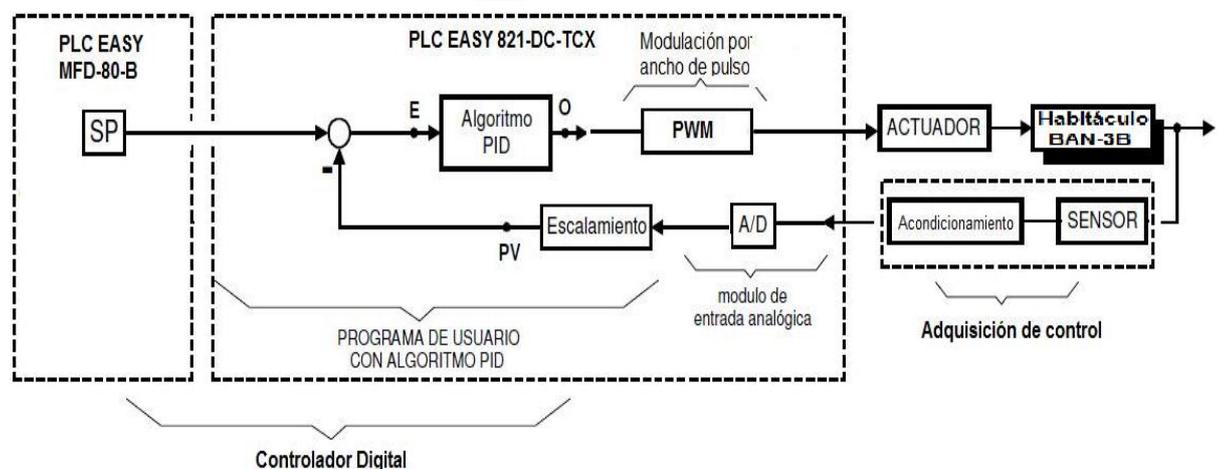


Figura 3.1 Diagrama general del control de temperatura.

3.1 FASE 1

3.1.1 Estudio de la planta de la burbuja neonatal modelo 3B

En esta etapa se ha realizado el análisis de los componentes de la planta que están relacionados al control de temperatura, tales como: habitáculo neonatal, controlador digital, módulo de adquisición y control, actuador, y el prototipo de control digital.

3.1.1.1 Habitáculo neonatal

Recinto de pequeñas dimensiones destinado a ser ocupado por el neonato, también conocido como lugar de condiciones apropiadas para que viva un neonato.



Figura 3.2 Habitáculo de la Burbuja Neonatal modelo 3B

3.1.1.2 Controlador Digital

El controlador digital de temperatura es un algoritmo PID que está caracterizado por un conjunto de ecuaciones implementadas en un bloque PID del PLC EASY 821-DC-TCX; con una interfaz PLC MFD-80-B+AC-CP8-ME que facilita su programación con el usuario, quien generalmente programa la temperatura entre el rango 25 °C a 37 °C con una resolución de 0.5 °C.



Figura 3.3 PLC EASY 821-DC-TCX interactuando con el PLC MFD-80-B [27].

3.1.1.3 Módulo de adquisición de control

El desarrollo del acondicionamiento de la señal de temperatura lo realizó el Ingeniero Electrónico Raúl Chipana [31], como parte de su trabajo de tesis, en el cual implementó el circuito de adquisición de control.

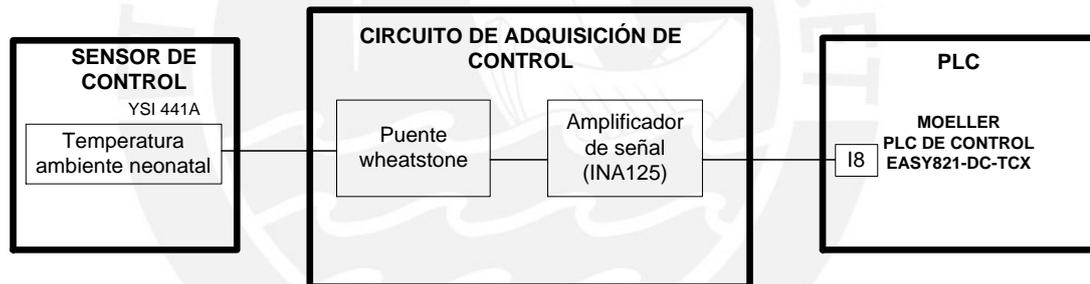


Figura 3.4 Diagrama de bloque del módulo adquisición de control [31]

3.1.1.4 Actuador

La potencia que disipa la resistencia calefactora es controlada por el PLC EASY 821-DC-TCX a través de una señal modulación por ancho de pulso generada por el bloque PWM del PLC.

El ancho de la señal PWM es determinado por la señal de control, dicha señal actúa sobre el driver de potencia el cual maneja el estado de conducción eléctrica de la resistencia calefactora. Para la elección del driver de potencia se tomó en cuenta el proyecto previo mencionado anteriormente.

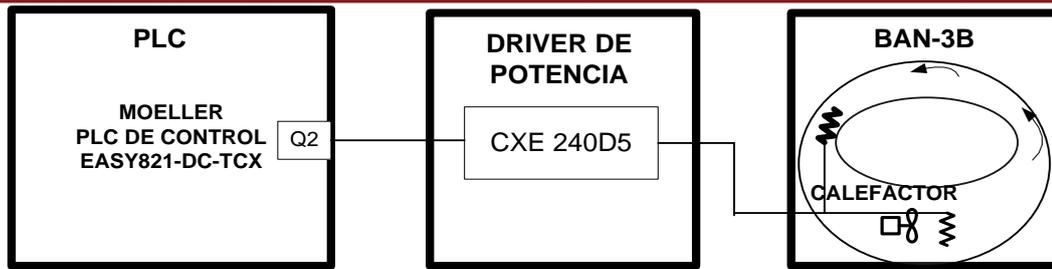


Figura 3.5 Diagrama de bloque etapa actuador [31]

3.1.1.5 Prototipo del algoritmo del control

La prueba del prototipo del algoritmo de control se realizó programándose a una temperatura de 32°C y teniendo como temperatura de ambiente 21.8 °C, **Figura 3.6**.

En la **Figura 3.7** se observa un control de temperatura incipiente de la Burbuja Neonatal 3B, y una estabilidad térmica de +/- 1.5 °C.

La prueba mencionada se realizó durante 2.8 horas aproximadamente (según **Figura 3.7** 10,000 segundos). La medición se hizo con un “sistema electrónico que permite medir y evaluar la distribución de temperaturas en incubadoras neonatales” (**Figura 3.6**), desarrollado en la PUCP por el Bachiller Jorge Coello como parte de su trabajo tesis.

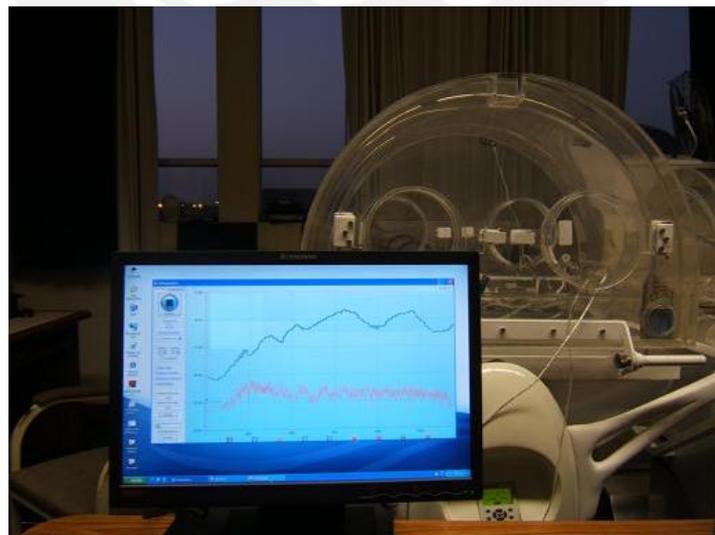


Figura 3.6 Evaluación de temperatura con el “sistema electrónico que permite medir y evaluar la distribución de temperaturas en incubadoras neonatales”

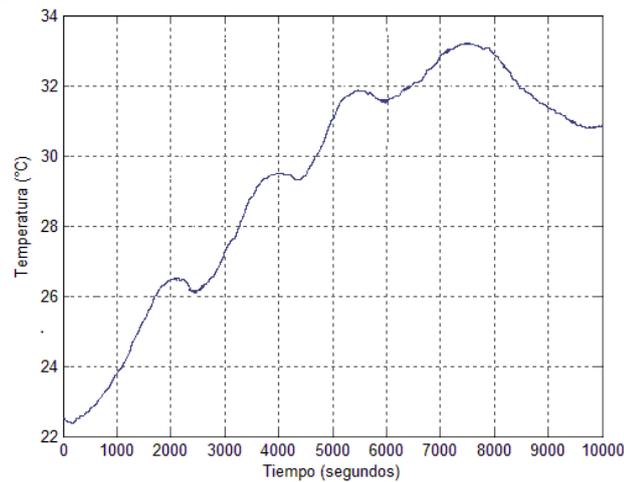


Figura 3.7 Comportamiento inicial de la temperatura de la Burbuja Neonatal 3B

3.1.2 Obtención de los parámetros del controlador PID

Para aplicar técnicas de sintonización de los controladores PID fue necesario identificar primero la dinámica del proceso, para posteriormente obtener los parámetros para el ajuste del controlador, utilizando el procedimiento de sintonización deseado.

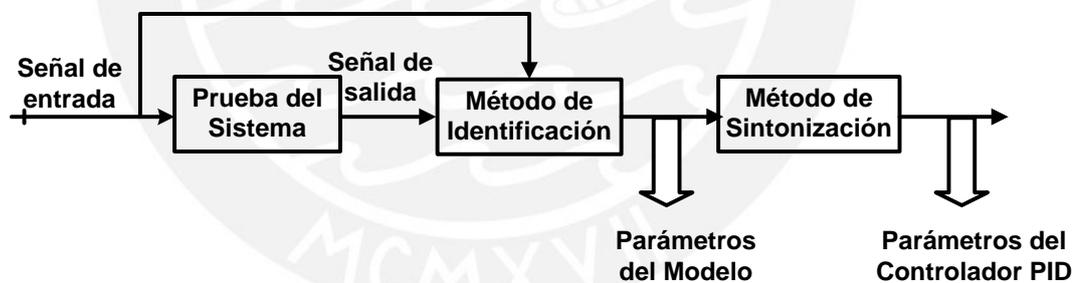


Figura 3.8 Etapas para obtener los parámetros del modelo del proceso y del controlador

En la **Figura 3.8** se observa cómo se obtiene los parámetros del controlador PID. A continuación se presenta las tres facetas: Prueba del sistema, método de identificación, método de sintonización.

3.1.2.1 Faceta 1, prueba del sistema

La curva de reacción del proceso se obtuvo por medio de una prueba de lazo abierto, en la condición mencionada se aplicó una señal tipo escalón en la entrada

del sistema y se registran, la señal tipo escalón como la salida del proceso, desde el instante en que se aplicó el escalón de entrada hasta que el sistema alcance un nuevo punto de operación estable.

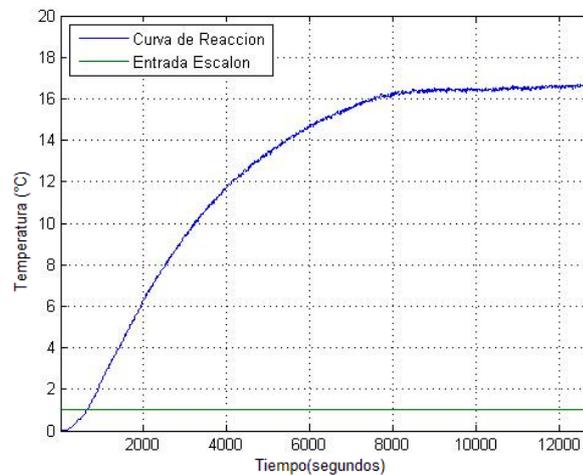


Figura 3.9 Curva de reacción y entrada escalón.

3.1.2.2 Faceta 2, identificación del sistema

Las técnicas de identificación se basan en el análisis de la curva de reacción, y son procedimientos esencialmente gráficos. Para esta etapa se usó la herramienta de software MATLAB 7.1, la identificación se dio mediante el método de tangente de Ziegler y Nichols.

El procedimiento requiere que se trace una recta tangente a la curva de reacción del proceso en su punto de inflexión o de máxima pendiente [32], como se muestra en la **Figura 3.10**.

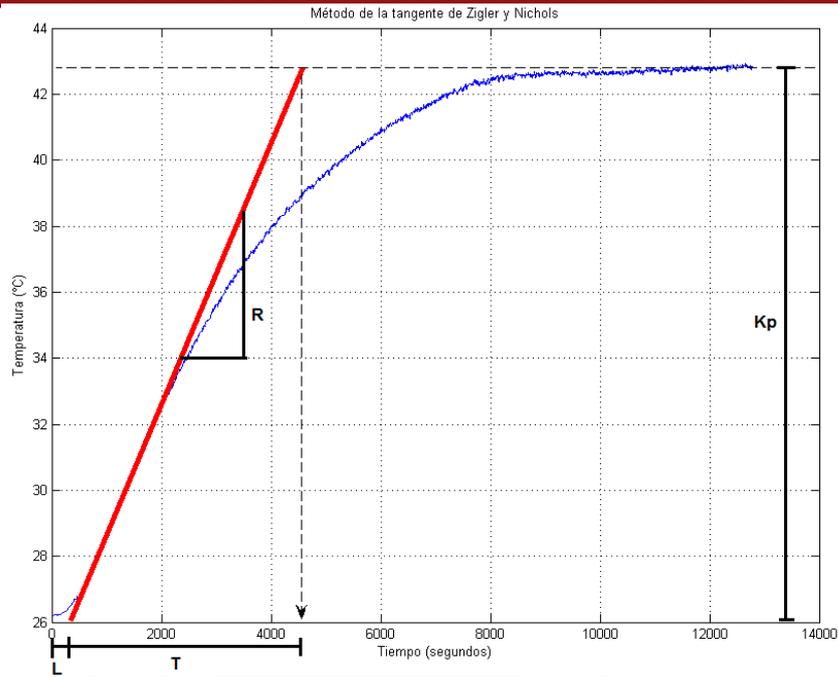


Figura 3.10 Curva de reacción y método de la tangente de Ziegler y Nichols

$$G_P = \frac{Kp * e^{-Ls}}{(T * s + 1)} = \frac{16.55 * e^{-8387s}}{(2413 * s + 1)} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

3.1.2.3 Faceta 3, sintonización del sistema

Los métodos de sintonización consisten en hallar los parámetros del controlador PID, si los efectos de la acción proporcional, integral y derivativa se combinan aprovechamos las ventajas de estas tres acciones de control individual, el procedimiento de sintonización utilizado fue el método de ziegler y Nichols, donde solo se necesita conocer el retraso del sistema L y la razón de reacción R (pendiente de la recta), Figura 3.10.

Tabla 3.1 Sintonización por el método de Ziegler y Nichols para la fase 1

	Ziegler y Nichols	Valor
Kc	2.0/RL a 3.33/RL	0.15
Ti	2.5L	2732,9
Td	0.4L	323,6

Por tanto los valores del controlador PID son:

Proporcional = 0.1; Integral= 2732,9; Derivativo= 323,6

Cabe resaltar que la simulación hecha en Matlab, el bloque de PID implementado en simulink, posee un PID de tipo paralelo, y por el contrario el PLC EASY 821-DC-TCX, posee un PID de tipo ideal.

3.1.3 Diseño e implementación del algoritmo de control

La implementación de algoritmo de control se desarrolló en el PLC EASY 821-DC-TCX en un lenguaje de tipo ladder con el programa EASY-SOFT 6 PRO proporcionado por los fabricantes de dicho PLC.

3.1.3.1 Esquema general

El algoritmo de control de temperatura para el habitáculo de la Burbuja Neonatal 3B, se dividió en 4 secciones: La primera fue el módulo de procesamiento de datos sensados del ambiente neonatal, el segundo el módulo de procesamiento de datos programados, la tercera sobre el control de temperatura y por último la modulación por ancho de pulso. La **Figura 3.11** presenta el diagrama de flujo general del algoritmo de control.

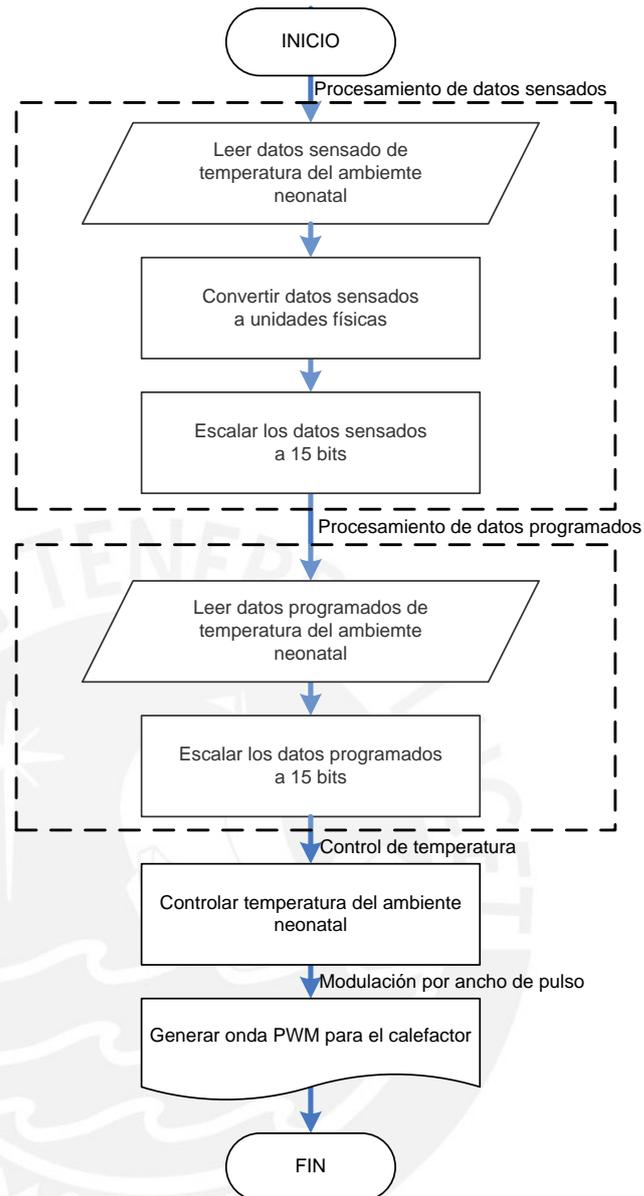


Figura 3.11 Diagrama de bloques general del algoritmo de control de temperatura

3.1.3.2 Módulo de procesamiento de datos sensados

Para el caso de la temperatura, la ecuación con la que se trabajó [31], fue la siguiente:

$$T = 0,1885 * V^2 - 4,912 * V + 43,784 \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde: T es la temperatura en grados centígrados (°C), y V es el voltaje en voltios.

El PLC Easy821-DC-TCX trabaja con un ADC de 10 bits en sus cuatro entradas analógicas, y recibe valores de 0 voltios a 9,99 voltios. La relación para transformar voltios a un número de 10 bits está dada por la siguiente ecuación:

$$B = \left(\frac{1023}{9,99} \right) * V \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde: B es un número de 10 bits, y V es el voltaje en voltios.

Utilizando las ecuaciones 3.2 y 3.3 obtenemos:

$$T = 0,0000179759 * B^2 - 0,0479676246 * B + 43,784 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Sin embargo, el PLC tiene una cantidad limitada de bloques con los que se puede trabajar, por lo que hay que utilizarlos de manera eficiente. Además, las operaciones con las que cuenta sólo operan números enteros de hasta 32 bits (31 bits, más 1 bit para el signo).

Tomando en consideración estas premisas, se decide escalar los valores de los coeficientes por 10^n , donde "n" es un número que posteriormente determinaremos.

Debido a que el PLC cuenta con un bloque que es capaz de escalar un valor de un rango lineal (LS, value scaling), primero se trabajó con los términos lineales de la ecuación y luego se analizó el término cuadrático. Así, con la siguiente parte de la ecuación:

$$T = -0,0479676246 * B + 43,784 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Se obtiene la Tabla:

Tabla 3.2 Valores del rango lineal de la ecuación temperatura vs valor digital del ADC de la fase 1

Temperatura, °C	Entrada del ADC, 10 bits	Valor (Ecuación 3.5)	Valor * FACTOR
13,525	1023	-5,286880	-52868800,00
14,854	921	-0,394182	-3941822,87
14,884	919	-0,298247	-2982470,38
20,323	645	12,844882	128448821,11
25,179	471	21,191249	211912487,98
29,985	328	28,050619	280506191,20
35,114	195	34,430313	344303131,96
39,972	82	39,850655	398506547,80
42,267	32	42,249036	422490360,12
42,361	30	42,344971	423449712,61
43,784	0	43,784000	437840000,00

Valor de $2^{31}-1$	2147483647,00
---------------------	---------------

FACTOR (10^7)	10000000
-------------------	----------

Donde el máximo número “n” al cual se puede elevar el número 10, para obtener el factor, es 7 (debido a que con un ocho se obtendría como valor máximo 4 378 400 000, el cual excede el máximo permitido, $2^{31}-1 = 2\ 147\ 483\ 647$).

Luego, se procede a analizar el término cuadrático. Al multiplicar su coeficiente con el factor obtenemos el valor: 179,759.

Ahora como la entrada del ADC es de 10 bits y se quiere aprovechar las operaciones con números de 31 bits (más 1 que es el signo), se tiene

$$2^{10} * 2^{10} * \text{Coeficiente} \leq 2^{31} - 1 \tag{Ecuación 3.6}$$

Donde el coeficiente permite un número máximo de $2^{11}-1$ (2047).

Con esta información podríamos multiplicar el coeficiente cuadrático por 10, con la finalidad de tener mayor precisión. Así, nuestro coeficiente cuadrático quedaría en 1797. Finalmente, tenemos la siguiente ecuación que se implementará en el PLC:

$$T = \frac{\left[\frac{1797 * B^2}{10} \right] - 479676 * B + 437840000}{10^4} \tag{Ecuación 3.7}$$

El coeficiente 479676,246 se redondeó a 479676. Además, se divide entre 10^4 con la finalidad de tener enteros escalados que tengan 3 decimales (p.e. 43,784 vendría estar representado por el número 43784).

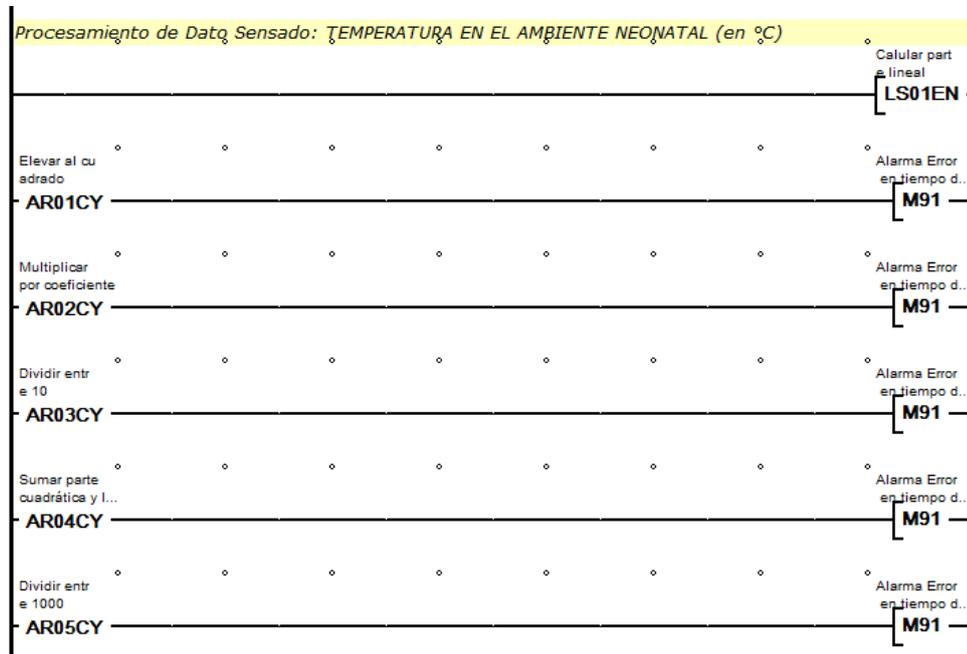


Figura 3.12 Interfaz gráfica del programa EASY-SOFT mostrando en diagrama ladder el algoritmo de procesamientos de datos sensados

La ecuación 3.7 que se implementó en el PLC arroja números de 31 bits en el rango de 13 519 a 43 784, por lo que se tiene que escalar estos valores a números de 15 bits, debido a que el bloque de control DC (PID Controller), que se utilizó para el control de temperatura en el ambiente neonatal, requiere este tipo de entrada. Finalmente, los valores escalados irán de 0 a 32 767.



Figura 3.13 Interfaz gráfica del módulo escalado de valores, donde se muestra el escalamiento de los datos sensados

3.1.3.3 Módulo de procesamiento de datos programados

Para el caso de la temperatura de mando, el Interfaz de Usuario envía estos valores en grados Celsius multiplicados por 1000 (enteros escalados de 31 bits). Por ejemplo, una temperatura de 35,7 °C la envía como el valor 35700.

Los valores de temperatura de mando se escalarán a números de 15 bits, debido que el bloque de control DC (PID Controller), que se utilizó para el control de temperatura en el ambiente neonatal, requiere este tipo de entrada. Se tomó en cuenta para esto que la ecuación de temperatura sensada arroja números de 31 bits en el rango de 13 519 a 43 784, siendo estos los valores mínimo y máximo para la escala. Finalmente, los valores escalados irán de 0 a 32 767.



Figura 3.14 Interfaz del módulo escalado de valores, mostrando el escalamiento de datos programados

3.1.3.4 Módulo control de temperatura

En este módulo se implementó el controlador PID y se trabajó con los parámetros del controlador obtenidos de la sintonización del sistema. **P = 0.15, I= 2732,9, D= 323,6.**

Las entradas del módulo vienen del procesamiento de datos sensados y programados. La salida una palabra marca, el cual será entregada al módulo de modulación por ancho de pulso.

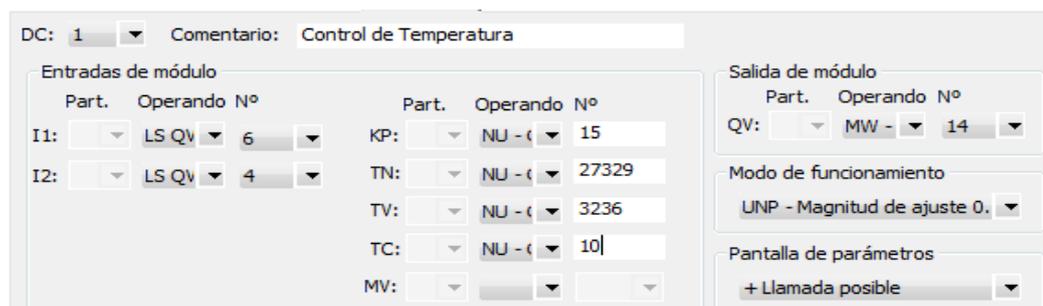


Figura 3.15 Interfaz módulo PID, mostrando los parámetros del controlador

El período de muestreo (tiempo de exploración) es crítico para el correcto funcionamiento del sistema de control, un criterio práctico: Entre 6 y 20 medidas durante el tiempo de subida

$$T_{muestreo} = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{20} \right) t_r \approx \frac{1}{10} t_r$$

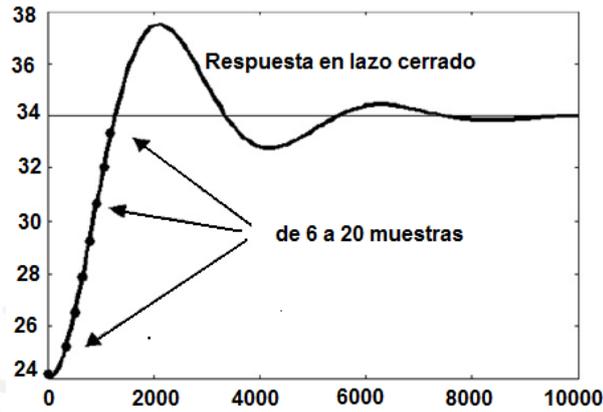


Figura 3.16 Elección de período de muestreo

De la **Figura 3.16** el período de muestreo máximo a asignar sería $(t_r/6)$, por otro lado se establecieron período de muestreos comunes para procesos:

Tabla 3.3 Períodos de muestreo para distintas variables

Tipo de Variable	Periodo de muestreo, s
Flujo	1 a 3
Nivel	5 a 10
Presión	1 a 5
Temperatura	10 a 20

Por lo expuesto, el período de muestreo seleccionado es 2 segundos, para no tener problemas con relación al período de muestreo ya que esta tiene un efecto de inestabilidad (si el período no llega a muestrear los cambios en el sistema) éste no es el caso, porque nuestra planta posee una dinámica lenta, temperatura. Por tanto, el periodo de muestreo de 2 segundos es más que suficiente.

3.1.3.5 Módulo modulación por ancho de pulso

Este módulo es el encargado de generar la onda PWM.

PW: 1 Comentario: PWM calefactor

Entradas de módulo

Part.	Operando	Nº
SV:	DC Q	1
PD:	NU - (2000
ME:	NU - (0

Pantalla de parámetros

+ Llamada posible

Figura 3.17 Interfaz modulación por ancho de pulso, mostrando los valores configurados

Para la elección del período se tuvo en cuenta que el actuador seleccionado (driver CXE240D5) es de tipo relay, el cual no tiene cruce por cero y por tanto si se da un período de 16.6 (frecuencia 60Hz), que equivale a la corriente alterna común, existiría el problema que el porcentaje de duración de periodo podría no necesariamente caer en el cruce por cero, por tanto no se tendría el porcentaje de potencia que se desearía en el calefactor, el cual es un problema considerable que afectaría al control; ante esta situación como no se puede variar el hardware porque ya es propio de la planta, se optó por aumentar el período de duración; escogiéndose un período de 2 segundos el cual me va a eliminar este problema y cumplirá con mi finalidad de entregar el porcentaje de potencia que se desea al calefactor. En la **Figura 3.18** se muestra ambos casos mencionados.

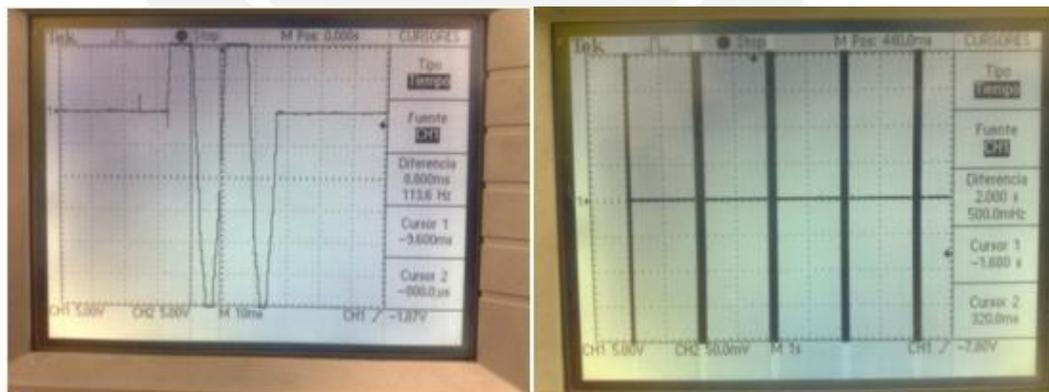


Figura 3.18 Elección del ciclo de duración para el PWM casos presentados para una duración de periodo de 8.3 ms y 2000 ms

En la Figura 3.18 mostrada la visualización se dio a la entrada del calefactor, se observa que para un período de duración de 8.3ms la señal que llega al calefactor no siempre se da (de 5 periodos mostrados solo se observa que en 2 de ellas existe

señal), por tanto existe problema; por el contrario para un periodo 2000ms no se observa este problema.

3.1.4 Ensayos y reajuste fase 1

3.1.4.1 Paso 1: Implementación y verificación primer prototipo

El primer prototipo de control se dio con un controlador PID, los valores del controlador probado se concluyeron de la etapa de identificación y sintonización expuesta previamente ($P = 0.15$; $I = 2732,9$; $D = 323,6$).

Temperatura programada = $36\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de ambiente = $24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

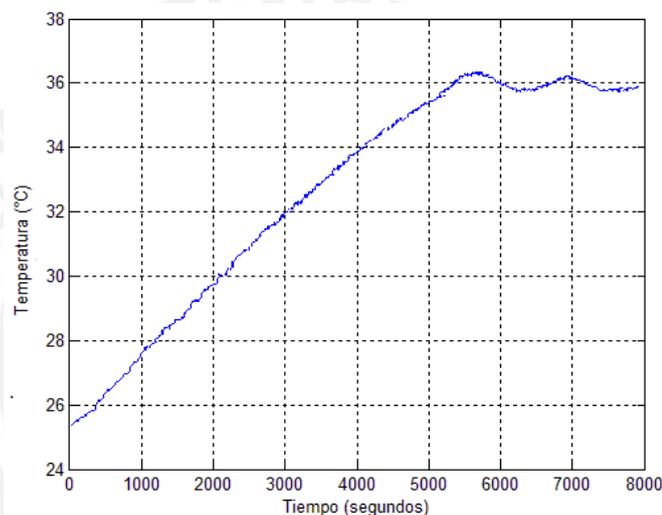


Figura 3.19 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, primer ensayo PID

En la prueba realizada se obtuvo un tiempo de calentamiento de 93 minutos y una precisión de estabilidad térmica de $\pm 0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.1.4.2 Paso 2: Implementación y verificación segundo prototipo

En el paso 1, se observa dos situaciones: Que existe una estabilidad térmica de $\pm 0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ y por otro lado el tiempo de calentamiento de 93 minutos. Por tanto se usa una estrategia de fusionar 2 controladores que funcionarán en 2 periodos; la primera, es un controlador PID con una ganancia elevada y en el segundo período se usará la ganancia obtenida en el paso 1, en la **Figura 3.20** se muestra la acción de los controladores.

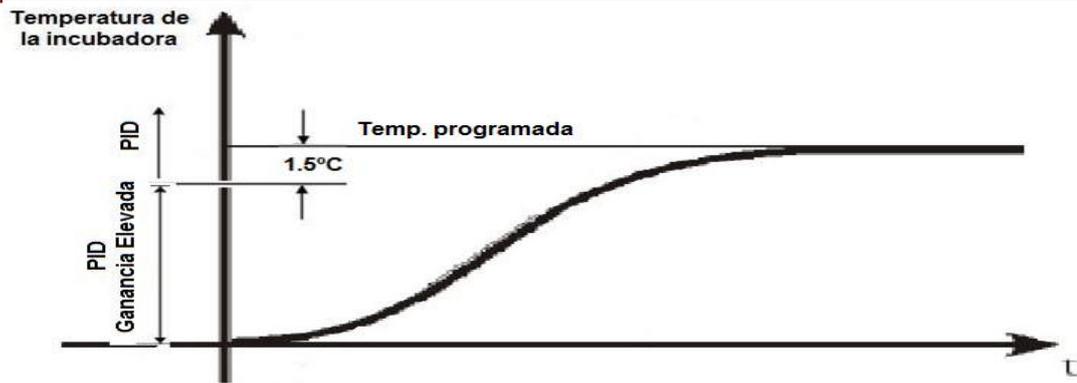


Figura 3.20 Gráfica mostrando la estrategia de control de temperatura

Para determinar exactamente hasta que valor actuará el controlador PID con ganancia amplia, se desarrolló un control de temperatura on / off.

Temperatura programada = 36 °C

Temperatura de ambiente = 23.99 °C

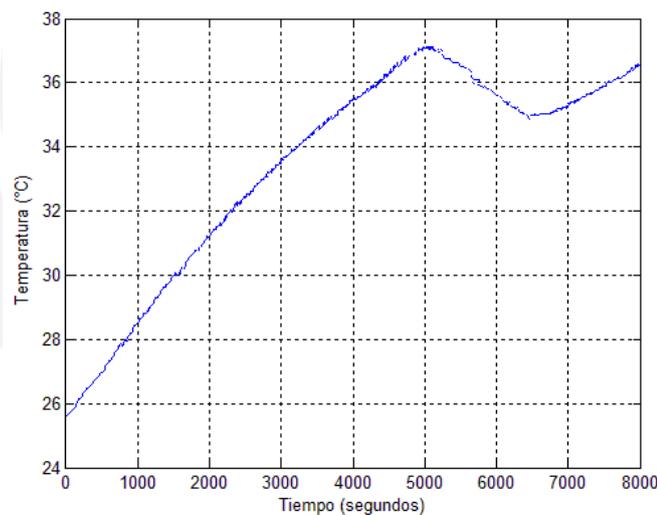


Figura 3.21 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, prueba control ON/OFF

En la Figura 3.21 se observa que se produce un sobreimpulso de hasta 1.5 °C debido a la inercia térmica que posee la planta, por tanto se concluye que a una temperatura previa de 1.5 °C antes de llegar al setpoint, el controlador PID actuara con ganancia amplia.

En la Figura 3.22 se presenta el código de la estrategia planteada. En el cual cambia la ganancia del controlador PID.

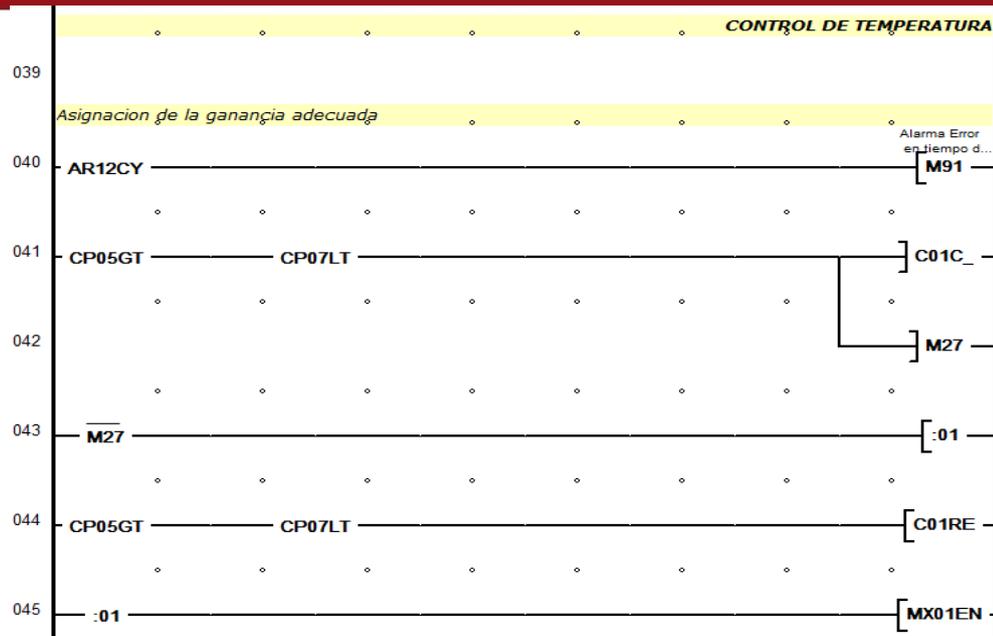


Figura 3.22 Interfaz gráfica del programa EASY-SOFT mostrando en diagrama ladder el algoritmo de la estrategia de control: variando la ganancia proporcional

A continuación, se realizó la prueba del controlador PID normal y el controlador PID con ganancia amplia. Para la ganancia amplia se escogió un valor de $P = 4$, se le dio este valor porque a una diferencia entre la temperatura sensada y programada de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, éste produce una señal de control con una potencia al 100%, lo cual se estaría comportando como un controlador ON/OFF pero a medida que dicha diferencia disminuye y se acerca hasta $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, su señal de control va disminuyendo; Para que finalmente entre en acción el controlador hallado anteriormente, paso1.

$P = 0.15$; $I = 2732,9$; $D = 323,6$

Temperatura programada = $36\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de ambiente = $24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$

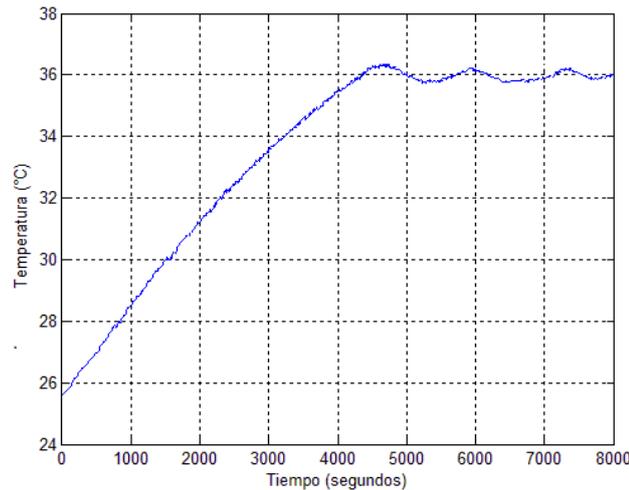


Figura 3.23 Gráfica variación de temperatura en el tiempo mostrando el resultado de la estrategia de control, resultado paso 2

En la Figura 3.23 se observa que el tiempo de establecimiento ha mejorado enormemente hasta 76.6 minutos y una estabilidad térmica de ± 0.64 °C.

3.1.4.3 Paso 3: Implementación y verificación tercer prototipo

Como se puede observar en la etapa 2, se obtuvo un controlador PID con resultados esperados con respecto al tiempo de calentamiento pero, negativos para la estabilidad térmica.

En la búsqueda de una sintonización más fina se optó por ver si necesariamente se necesitaba de un controlador PID, quizás era suficiente un derivado de este, por lo cual se verá el aporte de cada componente del controlador PID.

La primera prueba se realizó con un controlador puro proporcional sin acción integral ni derivativa. ($P=0.22$)

Temperatura programada = 34 °C

Temperatura de ambiente = 23 °C

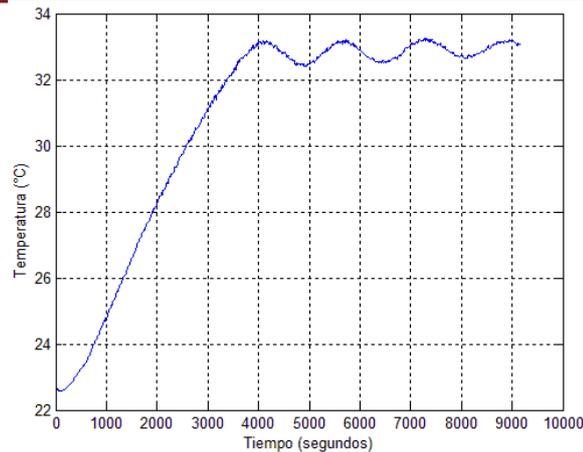


Figura 3.24 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, resultados del control proporcional puro

En la **Figura 3.24** se encontró 2 problemas: El error en estado estable va disminuyendo pero aumenta el tiempo de establecimiento; por otro lado se observa un error de setpoint de $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, por tanto se concluyó que se necesitaba de una acción integral para que elimine dicho problema, de setpoint. La segunda prueba se realizó con un controlador proporcional integral ($P=0.16$ y $I=2394$)

Temperatura programada = $36\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de ambiente = 24°C

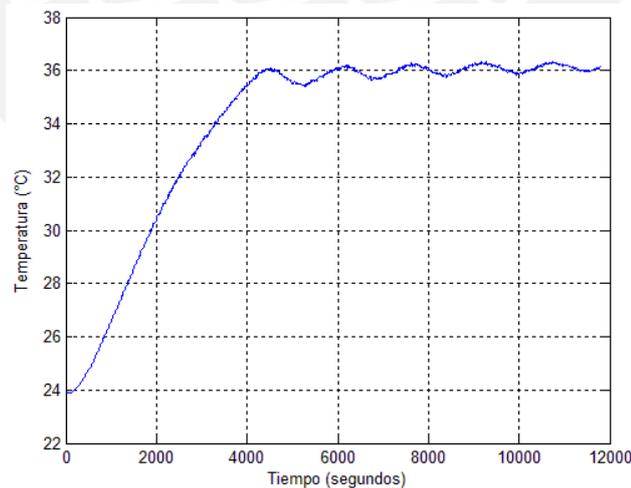


Figura 3.25 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, resultado del control proporcional integral

En esta prueba realizada se observa que el error de setpoint se ha eliminado, el error en estado estable fue de ± 0.43 . Pero no se ha eliminado la oscilación. Por tanto se necesita de una acción derivativa.

La tercera prueba se realizó con un controlador proporcional integral derivativo.

($P=0.16$; $I=2394.1$; $D=231.12$)

Temperatura programada = $34\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de ambiente = $22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

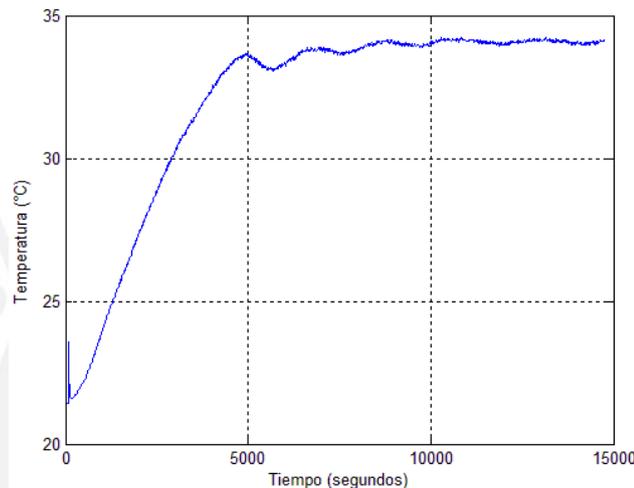


Figura 3.26 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, mostrando el resultado del control PID del paso 3

En el ensayo realizado se observó que necesariamente se necesita de un controlador PID, el tiempo de calentamiento fue de 66.7 min, y una estabilidad térmica de $\pm 0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.1.4.4 Paso 4: Implementación y verificación cuarto prototipo

Finalmente, con los conceptos obtenidos se realizó una sintonización más profunda, se disminuyó la ganancia proporcional para obtener menor estabilidad térmica; la acción integral se disminuye para mejorar el tiempo de establecimiento; y se aumentó el tiempo derivativo para que las oscilaciones disminuyan.

($P=0.13$; $I=2233.7$; $D=361.5$)

Temperatura programada = $36\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de ambiente = 24°C

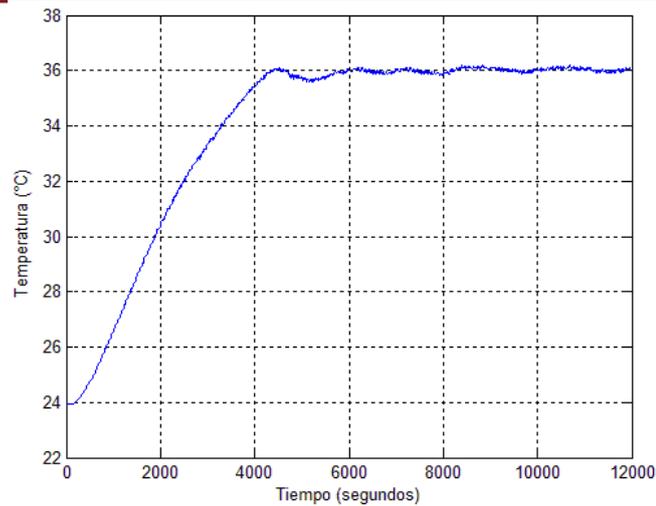


Figura 3.27 Gráfica variación de temperatura en el tiempo, mostrando el resultado del controlador PID final de la fase 1

Como resultado del cuarto paso, se observa un control con mejor desempeño, donde el tiempo de calentamiento es de 65 minutos, con una estabilidad térmica aproximada de ± 0.11 °C.

En el proceso de llegar a un control con mejores respuestas se encontró el problema de sobrecalentamiento del driver que maneja el calefactor, lo cual ocasionó la inoperatividad de este, Además la adquisición de la temperatura era oscilante, lo cual originaba datos erróneos de sensado. Estas fallas llevaron a realizar la reingeniería de la planta.

3.2 FASE 2: REINGENIERIA DE LA BURBUJA NEONATAL 3B

La reingeniería de la planta consistió en diseñar e implementar el subsistema electrónico.

3.2.1 Diseño e implementación del subsistema electrónico

En el diseño e implementación del subsistema electrónico se tomó en cuenta la Burbuja Artificial Neonatal modelo 3B, ya contaba con todas sus partes: Sensores, actuadores, etc. Por lo que la tarjeta a realizar tenía que adaptarse a esta.

En la **Figura 3.28** se observa el diagrama de bloques planteado e implementado para el diseño e implementación del subsistema electrónico de la Burbuja Artificial Neonatal modelo 3B, en esta se puede observar 4 bloques importantes: Módulo de adquisición, módulo de potencia, unidad de control y la interfaz gráfica. En esta fase se diseñará e implementará el módulo de adquisición y potencia.

El módulo de adquisición tendrá que cumplir los siguientes objetivos:

- Desarrollar un circuito de adquisición de temperatura del ambiente neonatal de $[14.5 \text{ a } 44.5]^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para ser enviado al PLC EASY - 821-DC –TXC.
- Desarrollar un circuito de seguridad de la temperatura del ambiente neonatal.
- Desarrollar un circuito de adaptación entre los sensores de flujo y el PLC EASY -821-DC –TXC.

El módulo de potencia tendrá que cumplir los siguientes objetivos:

- Desarrollar un circuito de acondicionamiento para el PLC EASY -821-DC –TXC que permita manejar el calefactor.
- Desarrollar un circuito de seguridad que permita habilitar o deshabilitar el calefactor independiente del PLC EASY -821-DC –TXC.
- Desarrollar un circuito de adaptación entre PLC EASY -821-DC –TXC y el compresor.

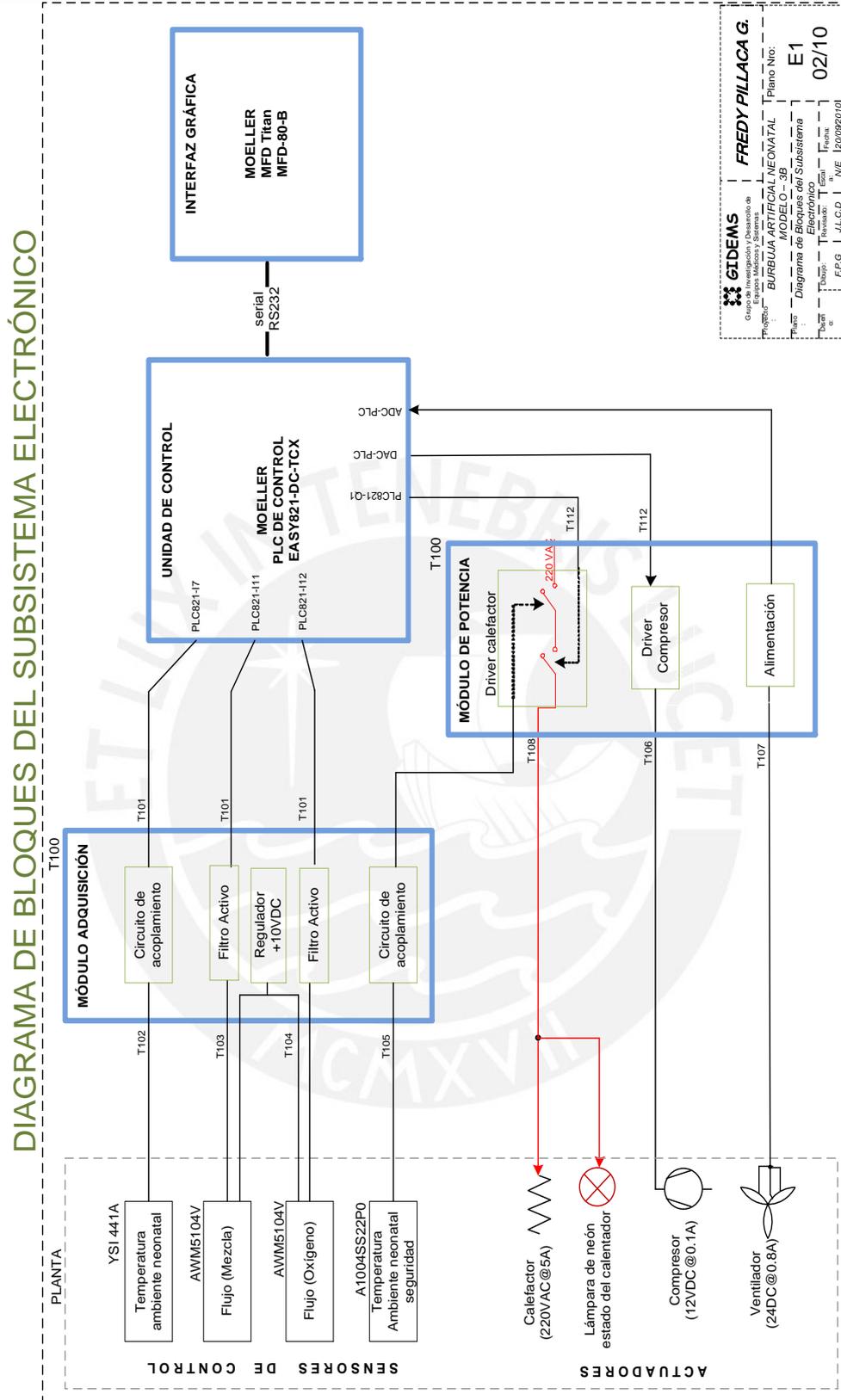


Figura 3.28 Diagrama de bloques de la reingeniería del subsistema electrónico de la BAN-3B

3.2.1.1 Módulo de adquisición

El circuito de adquisición de control tiene como función recibir las señales de temperatura y de flujo para adecuarlos y entregarlos al PLC; cada uno de estas variables ingresará a sus respectivos ADC. Las líneas de alimentación a usar son +12Vdc, GND.

3.2.1.1.1 Descripción de los sensores

Se usó los sensores existentes: sensores de temperatura, sensores de flujo.

Tabla 3.4 Sensores mostrando sus características resaltantes para el módulo de adquisición

SENSOR	DESCRIPCION	CARACTERISTICAS
YSI 441A	Sensor de temperatura para el habitáculo	14.5 °C → 3650Ω 44.5 °C → 1000Ω
Spectrum ES110	Sensor de temperatura para el habitáculo, seguridad	25 °C → 10000Ω 44.5 °C → 5535Ω
Honeywell AW5104VN	Sensor de flujo de oxígeno y flujo de mezcla	20l/m → 5V 0l/m → 1V

3.2.1.1.2 Etapas del módulo de adquisición

El circuito de adquisición de control está dividido en bloques funcionales como se muestra en la **Figura 3.29**. Está a la vez se agrupa en paquetes y son:

- Temperatura del ambiente neonatal
- Temperatura del ambiente neonatal seguridad
- Flujo de mezcla
- Flujo de Oxígeno

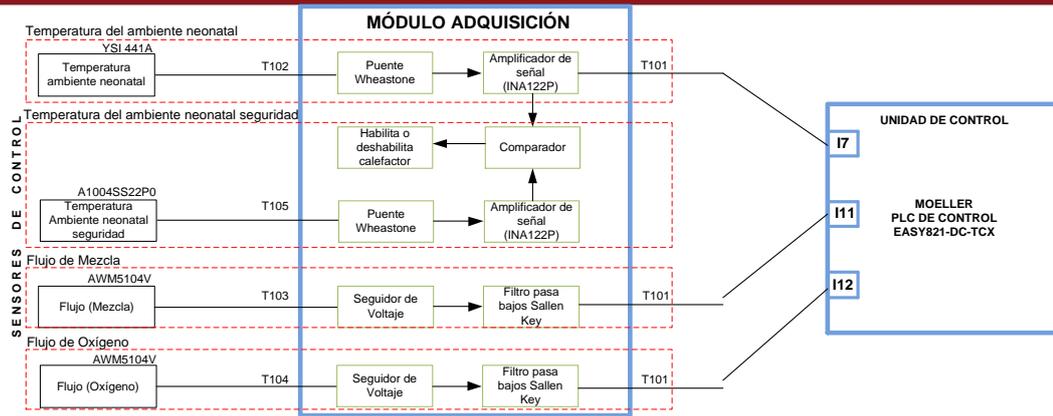


Figura 3.29 Diagrama de bloques de la reingeniería del módulo de adquisición

El sensor de temperatura YSI 441A forma parte del Puente de wheatstone por medio de los terminales T102. El Puente de wheatstone es una red potencio-métrica doble con medida diferencial de voltaje. Es decir, la medida fluctúa a ambos lados de un voltaje de equilibrio (normalmente 0 voltios), pero la señal final del puente es pequeña en comparación a nivel de voltaje que recibe el PLC. Ante esto, la señal se amplifica para un mejor tratamiento. Finalmente, la señal de temperatura sale por el terminal T101.

El sensor de temperatura A1004SS22P0 está conectada al terminal T105 recibe el mismo acondicionamiento de la temperatura del ambiente para luego ser comparada y finalmente tomar la decisión de habilitar o deshabilitar el calefactor.

Los sensores de mezcla y oxígeno conectados al terminal T103 y T104 respectivamente pasan por un filtro activo pasa bajos Sallen Key; y finalmente las señales de flujo salen hacia el PLC por los terminales T101.

3.2.1.1.3 Temperatura del ambiente neonatal

A continuación se describe el circuito diseñado para acondicionar la señal de temperatura proveniente de la cápsula neonatal: Un regulador de voltaje de precisión conformado principalmente por un diodo zener de precisión de 1.237 V (D1) es utilizado para brindar precisión en los datos obtenidos del termistor y las resistencias. Este voltaje de 1.237V alimenta el puente Wheatstone utilizado en la etapa de amplificación.

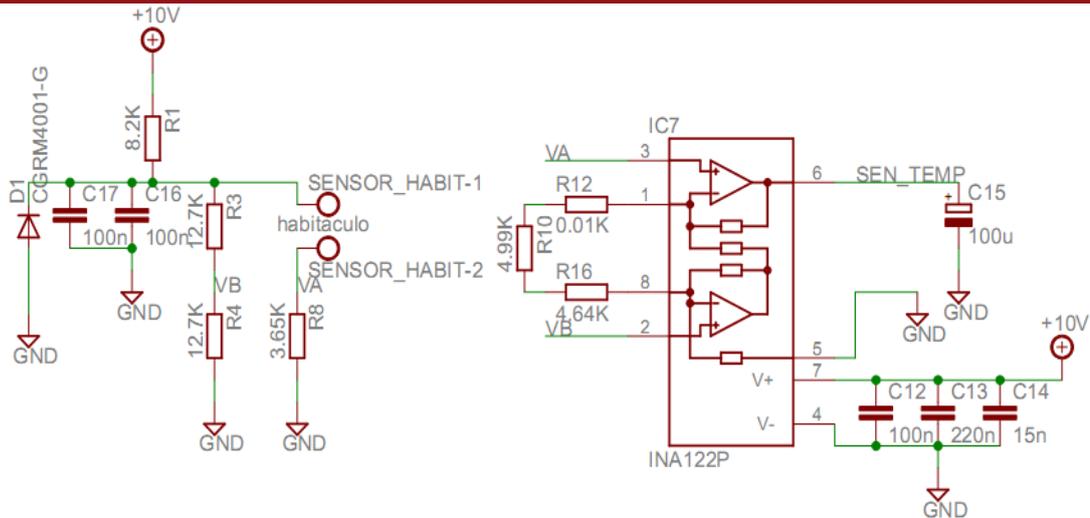


Figura 3.30 Diagrama esquemático del acondicionamiento del sensor de temperatura

Puente wheastone

El circuito se utiliza inicialmente para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia de baja medida. La disposición en puente también es ampliamente utilizada en instrumentación electrónica. Para ello, se sustituyen una o más resistencias por sensores que al variar su resistencia dan lugar a una salida proporcional a la variación.

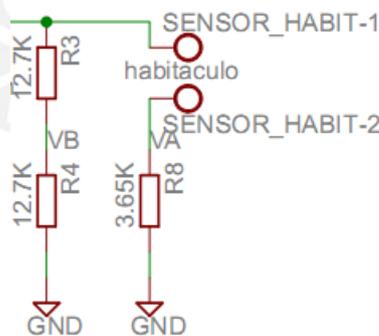


Figura 3.31 Diagrama esquemático del puente wheastone del acondicionamiento de temperatura

La diferencia de voltaje entre los puntos VB y VA depende los valores de la resistencia, el sensor de temperatura forma parte de la red del puente ubicada en el terminal SENSOR_HABIT de la Figura 3.31.

Para facilitar los cálculos de la diferencia de voltaje, llamaremos por el momento R_s a la resistencia del sensor de temperatura.

$$V_m = V_a - V_b \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Desarrollando la ecuación anterior desde el circuito mostrado en la Figura 3.31.

$$V_m = 1.237 \times \frac{3.65K}{R_s + 3.65K} - 1.237 \times \frac{12.7K}{12.7K + 12.7K} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$V_m = 1.237 \times \frac{3650}{R_s + 3650} - 0.6185 \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$$V_m = \frac{2257.525 - 0.6185 \cdot R_s}{R_s + 3650} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Como resultado se observa una ecuación no lineal, el puente Wheatstone no será lineal ya que consiste en la diferencia de dos divisores de tensión y estos no tienen naturaleza lineal.

No necesitamos una ecuación lineal, pero si debemos saber el comportamiento de R_s para saber finalmente el comportamiento de la señal de salida del puente Wheatstone. Como mencionamos antes R_s representaba la resistividad del sensor de temperatura YSI441A. El fabricante facilita una tabla de mediciones realizadas bajo condiciones de laboratorio [33]. Finalmente, de estos datos se puede extraer una relación de resistividad en función de la temperatura. Para 14.5 °C y 44.5 °C el sensor equivale a 3650Ω y 1000Ω respectivamente.

Amplificador de señal

Para el análisis y selección del amplificador operacional se compararon los integrados de los fabricantes: Analog Devices, National Semiconductor y Texas Instruments. Entre estos se tiene a los LM324 y OPA300. Luego de la evaluación de características se determinó el uso del INA122 por tener mejor performance en cuanto a impedancia de entrada (10¹⁰ ohmios), relación de rechazo en modo común (80 dB), además de cumplir con los requerimientos eléctricos mínimos y su alto uso en equipos médicos ECG, EEG, EMG [34].

La función del amplificador es elevar la tensión proveniente del puente Wheatstone hacia el PLC EASY -821-DC -TXC.

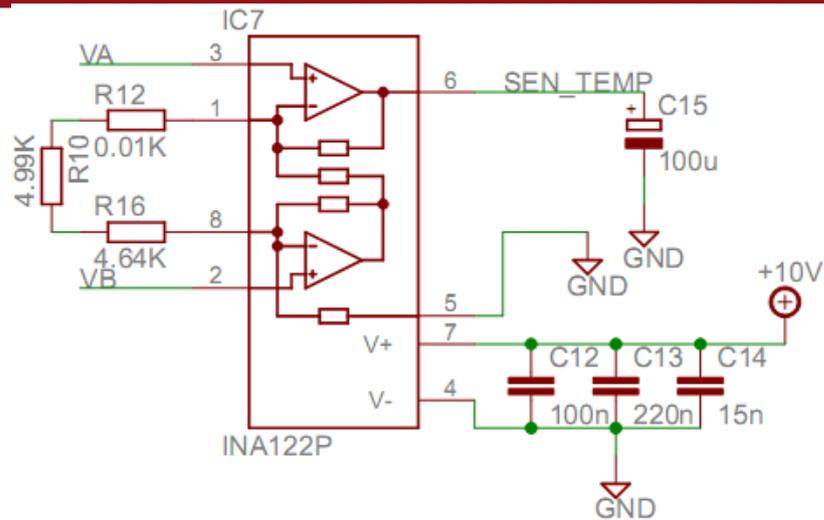


Figura 3.32. Diagrama esquemático del circuito amplificador de señal de temperatura, INA122

Características de la señal de entrada del amplificador:

Voltaje de entrada: 0.0V a 0.3524Vdc, recordemos que este voltaje lo entrega el puente weatstone.

La ganancia del amplificador debe ser de 25, con el cual se consigue un voltaje de salida en el rango de 0 a 8.81Vdc. La ecuación para el cálculo de la ganancia lo brinda el fabricante:

$$G = 5 + \frac{200k}{R_G}$$

Donde R_G es el valor de la resistencia en $k\Omega$ ubicada en los pines 1 y 8 del integrado INA122 [34]. Para lograr ganancia deseada se cuenta con dos resistencias en serie 4.64 $k\Omega$ y 4.99 $k\Omega$.

$$G = 5 + \frac{200K\Omega}{R_s\Omega} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$G = 5 + \frac{200K\Omega}{4.64K\Omega + 4.99K\Omega} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

$$G = 25.7684319834 \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Finalmente la salida del amplificador es V_t , el cual es el resultado de multiplicar el V_m por la ganancia G . Es decir, la ecuación 3.10 multiplicada por 25.7684.

$$V_t = V_m * G \quad \text{Ecuación 3.14}$$

$$V_t = \left(\frac{2257.525 - 0.6185 * R_s}{R_s + 3650} \right) * 25.7684319834 \quad \text{Ecuación 3.15}$$

Graficando la ecuación 3.15 mediante el Excel se obtiene la curva mostrada en la Figura 3.33.

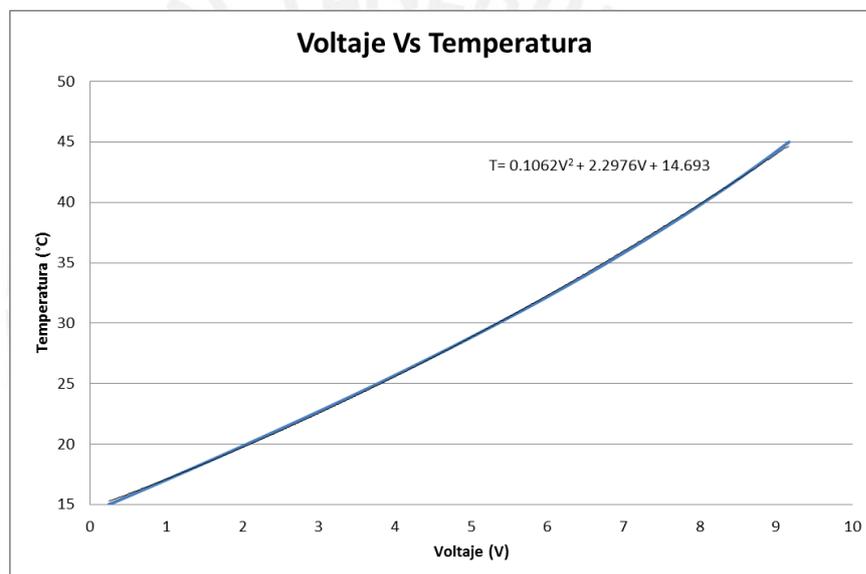


Figura 3.33 Gráfica variación de temperatura en el tiempo del circuito de acondicionamiento del sensor de temperatura

Para obtener la curva temperatura en función al voltaje es necesario hacer una regresión, para esto se puede usar fácilmente el Microsoft Excel. La ecuación de la temperatura en función del voltaje es importante ya que ayudará en la programación del PLC para realizar el control.

3.2.1.1.4 Temperatura del ambiente neonatal seguridad

La temperatura de seguridad se perciben dos etapas: adquisición y comparación para habilitar y deshabilitar al calefactor.

La adquisición de la temperatura del ambiente neonatal de seguridad básicamente es similar a la de la temperatura del ambiente neonatal: puente wheastone, amplificador de señal, en la Figura 3.34 se muestra el esquemático de esta.

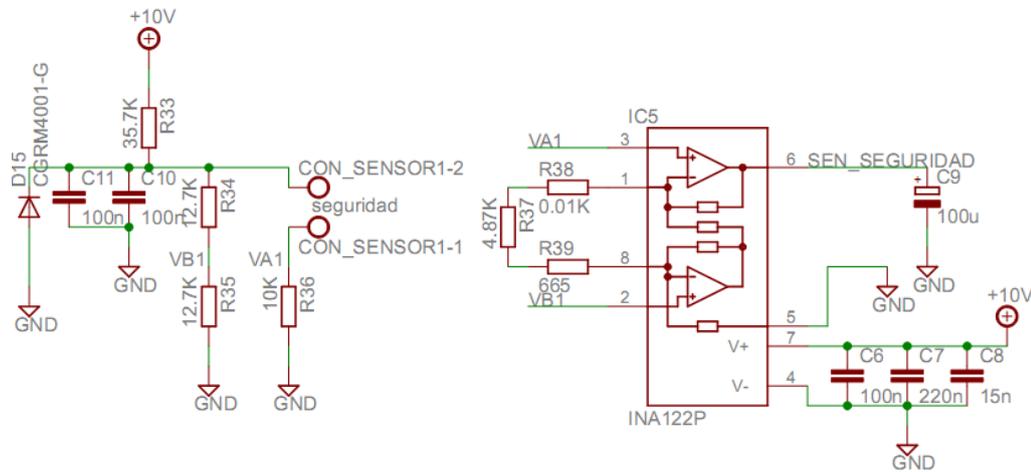


Figura 3.34 Esquemático del acondicionamiento del sensor de temperatura seguridad

Puente wheastone y amplificador de señal

En el puente wheastone se tiene la ecuación.

$$V_m = 1.237 \times \frac{10K}{R_s + 10K} - 1.237 \times \frac{12.7K}{12.7K + 12.7K} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

$$V_m = \frac{6185 - 0.6185 \cdot R_s}{R_s + 10000} \quad \text{Ecuación 3.17}$$

El sensor varía de 10000Ω hasta 5535Ω que representa a 25°C y 44.5°C , esto es según la hoja de datos del fabricante. Entonces V_m varía desde $0.0V$ a $0.1777V$ DC

La ganancia del amplificador debe ser de 40, con el cual se consigue un voltaje de salida en el rango de 0 a $7.3122V_{dc}$.

$$G = 5 + \frac{200K\Omega}{R_s\Omega} \quad \text{Ecuación 3.18}$$

$$G = 5 + \frac{200K\Omega}{4.87K\Omega + 665\Omega} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$G = 41.13369$$

Finalmente, la salida del amplificador es V_t , el cual es el resultado de multiplicar el V_m por la ganancia G . Es decir, la ecuación 3.17 multiplicada por 41.13369.

$$V_t = V_m * G \quad \text{Ecuación 3.20}$$

$$V_m = \left(\frac{6185 - 0.6185 * R_s}{R_s + 10000} \right) * 41.13369 \quad \text{Ecuación 3.21}$$

Luego, se procedió a realizar la prueba experimental y para una temperatura de 40 °C, se obtiene un voltaje de 6.77 V DC, este dato será de mucha importancia para poder realizar la seguridad.

Comparador Histéresis

En esta parte se usa el amplificador operacional LM358 debido a que pueden funcionar con voltajes de suministro tan bajo como 3,0 V o de hasta 32 V y solo con voltaje positivo (GND, VCC).

El amplificador operacional se usa en la configuración de comparador de histéresis, se tiene 2 entradas (voltaje del sensor de seguridad y el voltaje de referencia) con la cual se hace la comparación para poder habilitar o deshabilitar el calefactor.

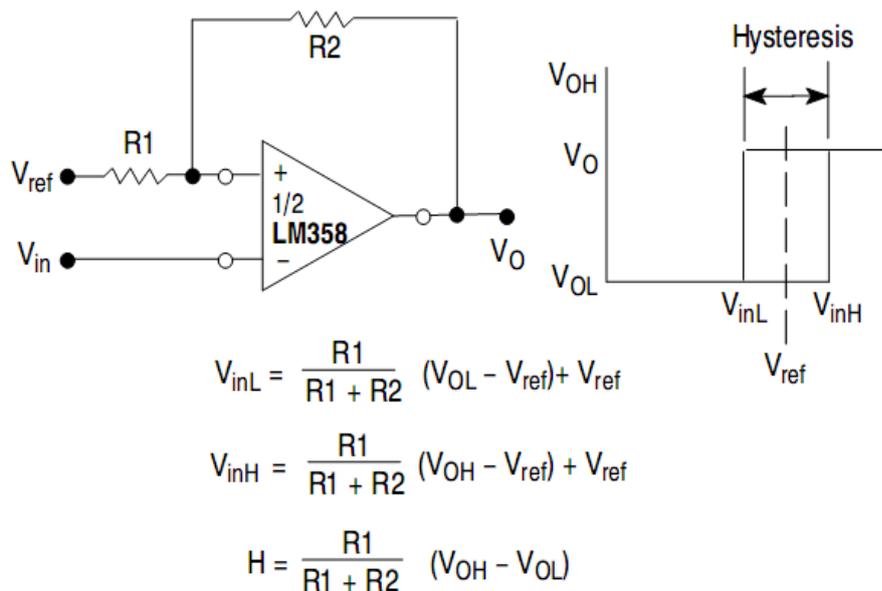


Figura 3.35 Configuración de comparador de histéresis mostrando las fórmulas para hallar las resistencias de la configuración histéresis [35].

$$V_{inL} = 6.70 = \frac{R1}{R1+R2} \times (0 - 6.77) + 6.77 \quad \text{Ecuación 3.22}$$

$$V_{inH} = 6.80 = \frac{R1}{R1+R2} \times (8.44 - 6.77) + 6.77 \quad \text{Ecuación 3.23}$$

$$V_{inH} - V_{inL} = 6.8 - 6.7 = \frac{R1}{R1+R2} \times (8.44 - 0) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Se tiene 3 variables y 2 incógnitas se coge las 2 primera ecuaciones, calculando se obtiene $R1= 0.999$ Y $R2=5374$; una relación de $n=5374/0999=5379$, con el fin de acotar el rango de histéresis se considera una relación de 1000. Entonces de usa $R1=1K \Omega$ y $R2=1000K \Omega$.

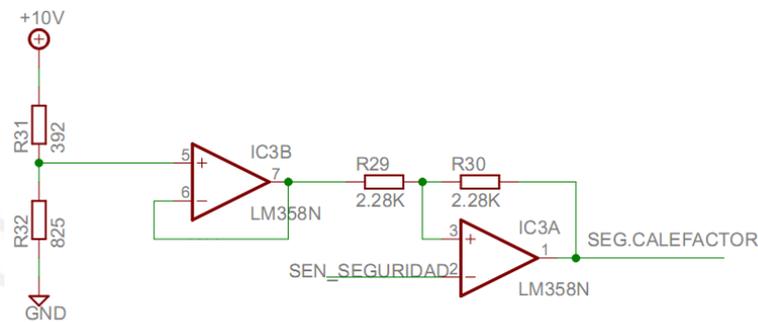


Figura 3.36 Esquemático implementado para la seguridad de temperatura.

Para la simulación de la histéresis, se usó el programa Proteus versión 7.5 Sp3. En la Figura 3.37 se muestra el esquemático de la simulación.

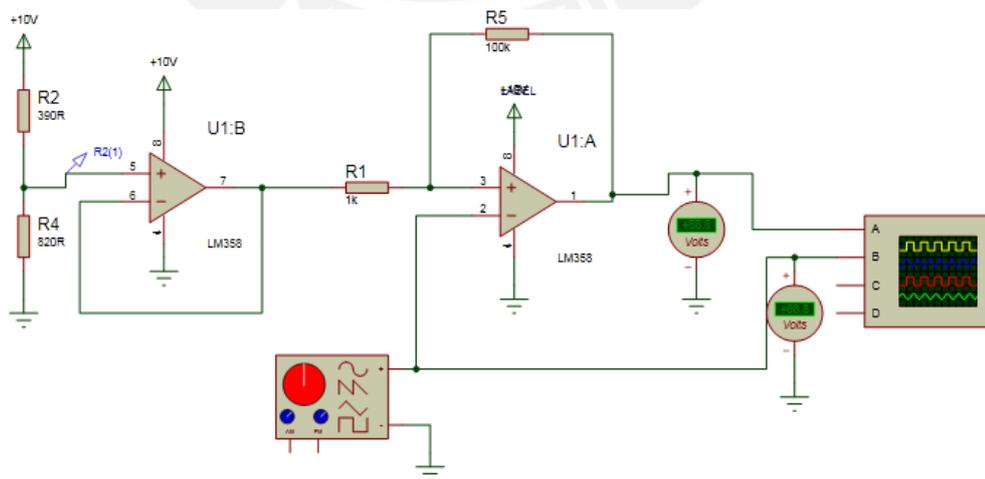


Figura 3.37 Esquemático implementado para la simulación de la seguridad de temperatura, histéresis en el programa Proteus V.7.5

En la Figura 3.38 se observa los resultados de la simulación histéresis.

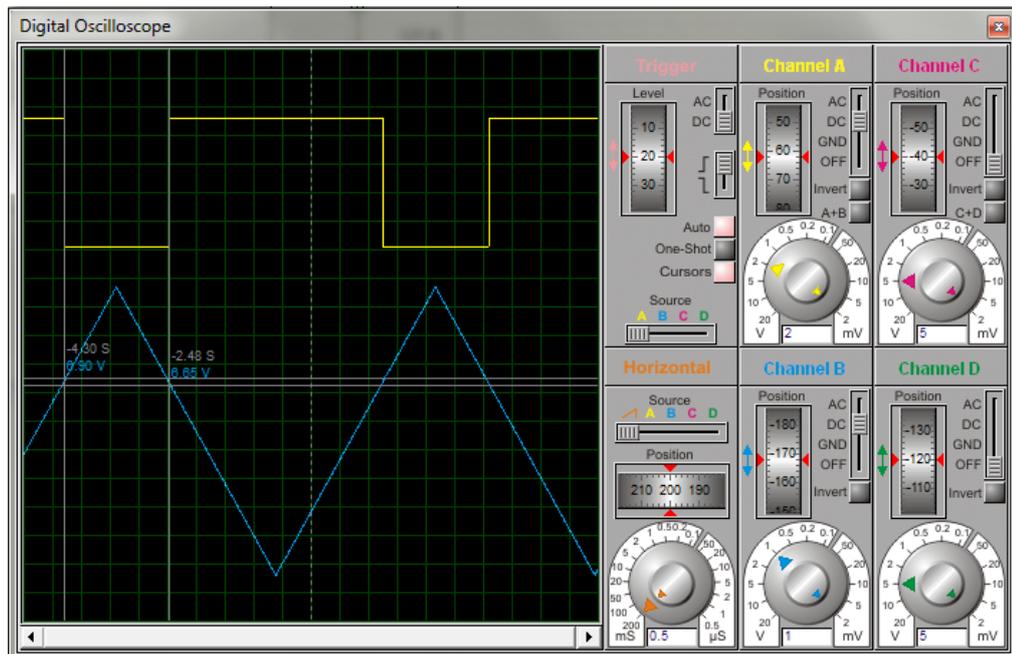


Figura 3.38 Resultado de la simulación de histéresis en el osciloscopio digital de Proteus V.7.5

En la Figura 3.38 se muestran 2 datos: Canal A (línea amarilla) es la salida de la histéresis, y canal B (línea azul) es una onda triangular, la cual representara la señal que llega al PLC (sensor de temperatura). Observamos que existe un cambio de nivel de alta a baja para un valor de 6.9VDC y en el cambio inverso se da para un valor de 6.65 VDC.

3.2.1.1.5 Flujo de mezcla y Oxígeno

El circuito contendrá un filtro activo pasa bajos Sallen Key. Este circuito entregará los siguientes voltajes para los siguientes valores de flujo:

$$5V \rightarrow 20l/m$$

$$1V \rightarrow 0l/m$$

Los valores del filtro pasabajos se halló con la ayuda del programa FilterPro Versión 3.0.28.21072 de Texas Instrument. La frecuencia de corte del filtro fue calculado experimentalmente (1Hz).

En la Figura 3.39, Observamos la topología del circuito, Sallen Key.

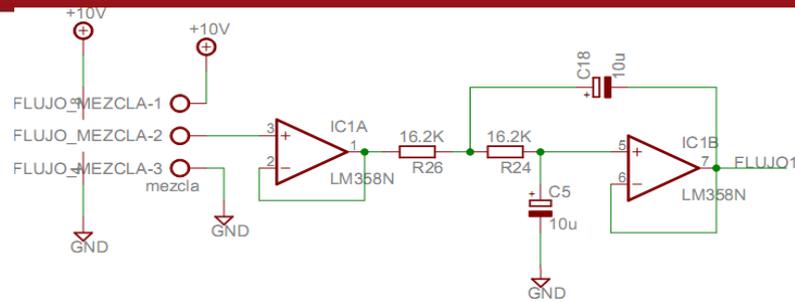


Figura 3.39 Esquemático implementado para la mezcla de gases.

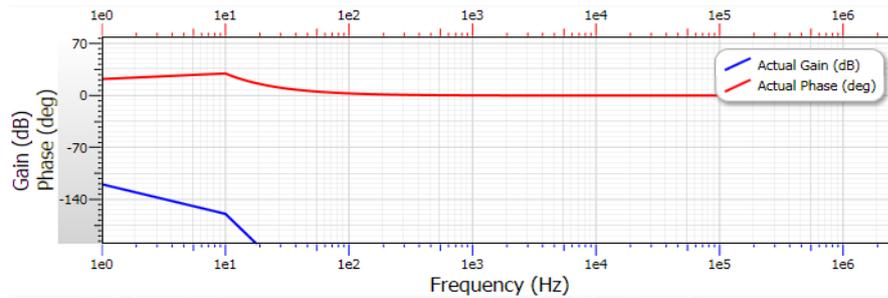


Figura 3.40 Gráfica ganancia y fase v.s frecuencia, resultados de la simulación del filtro activo pasabajos en el programa FilterPro.

En la Figura 3.40 se observa el resultado del filtro pasabajos de orden 1, para una ganancia de 1, para la frecuencia de corte de 1Hz y un factor de calidad de 0.51. La respuesta del filtro tipo Butterworth, con una topología de circuito SallenKey.

3.2.1.2 Módulo de potencia

El módulo de potencia se encarga de controlar las cargas eléctricas de los actuadores: compresor, ventilador, calefactor y seguridad del calefactor.

3.2.1.2.1 Descripción de los actuadores

Se usó los actuadores existentes: compresor, ventilador y calefactor..

Tabla 3.5 Actuadores mostrando sus características resaltantes para el módulo de potencia

Actuador	Voltaje	Alimentación	Características
Compresor	0-24 VDC	0.5	Señal analógica
Ventilador	24 VDC	0.4	Brinda un voltaje proporcional a las revoluciones
Calefactor	220 VAC	2	

3.2.1.2.2 Etapas del módulo de potencia

El módulo de potencia está dividido en bloques como se muestra en la Figura 3.41.

- Temperatura del ambiente neonatal
- Flujo de mezcla
- Ventilación de anillo térmico

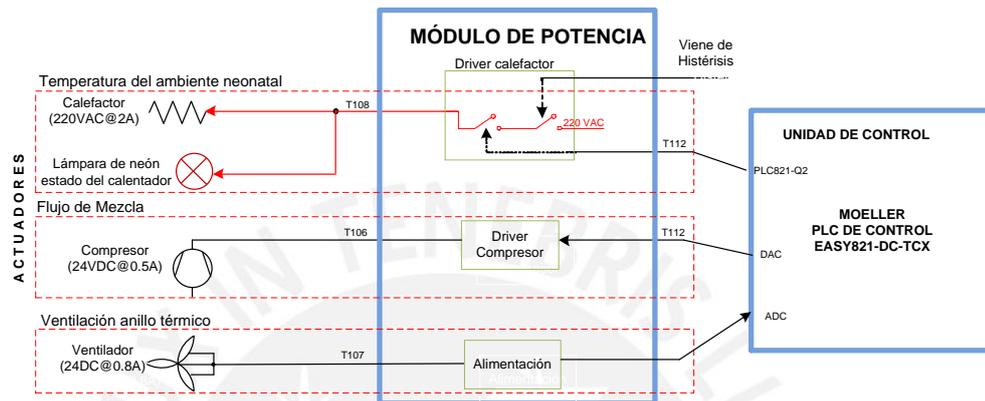


Figura 3.41 Diagrama de bloques del módulo de potencia

La potencia que disipa la resistencia calefactora (T108) es controlada por el PLC EASY 821-DC-TCX (T112) a través de una señal modulación por ancho de pulso generada por el bloque PWM del PLC (PLC821-Q2). También se observa la posibilidad de habilitar y deshabilitar la resistencia calefactora por la etapa de seguridad.

El compresor necesita una señal analógica 0- 24 VDC hasta 1 A de corriente (T106), la salida DAC del PLC EASY 821-DC-TCX va de 0 a 10 VDC a 20mA (DAC-PLC), por tanto se necesita una etapa de potencia de adaptación.

El ventilador no necesita un circuito de adaptación solo se le hace un puente de la fuente hacia el ventilador; pero, para el caso del sensado de las revoluciones del ventilador que es propio de este, se le hace una etapa de filtro para que pueda llegar al controlador primario mermado de ruido.

3.2.1.2.3 Temperatura del ambiente neonatal para la seguridad

El regulador del ambiente neonatal es el calefactor, este necesita 220VAC hasta 2A de corriente, la salida del controlador es una onda PWM de 22VDC a 20mA.

Se eligió para el control del calefactor un relé de estado sólido (S216S02), este es una integración de un emisor infrarrojo de diodo, un detector de phototriac y una salida principal triac, lo cual lo hacen ideales para el control de cargas de alto voltaje de corriente alterna [36]. Otro aspecto importante de elección fue que ya se ha trabajado con este relé y se ha obtenido un rendimiento fiable. Para el funcionamiento del S216S02 se le necesita excitar con una corriente de 10mA, y la resistencia R13 (Figura 3.42) se encarga de dar dicha corriente.

Por otro lado, para el lado de la seguridad del calefactor se utiliza un relé; pero, debido a que actuará en casos extremos, su cambio de estado entre swicheo es mínimo por lo que se usa relé electromecánico (70M-OAC5A); para excitar a este se necesita una tensión de 10VDC, para esto se necesita un regulador de voltaje de 10V.

Además, se usa un fusible de 3A en una de las líneas de 220VAC, para proteger los componentes electrónicos, en caso de cortos y excesos de corriente.

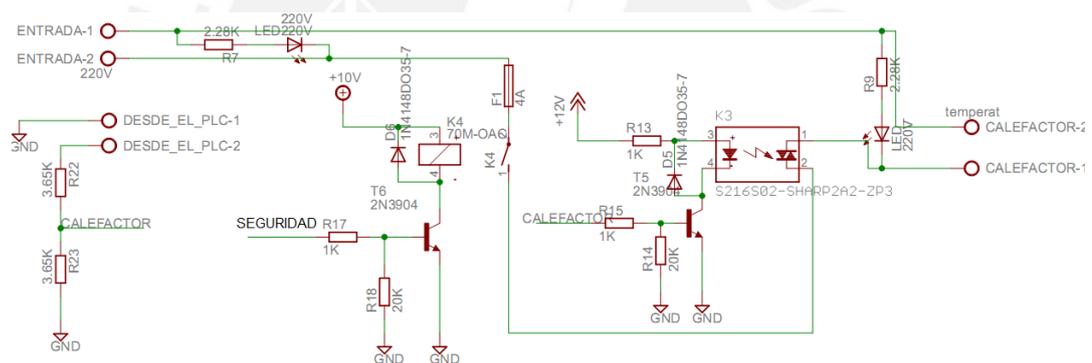


Figura 3.42 Esquemático del acondicionamiento del calefactor

3.2.1.2.4 Flujo de mezcla

El compresor es el elemento a regular el flujo de mezcla. Se elige el OPAM LM358, debido a que puede trabajar solo con voltaje positivo. Por otro lado, se elige el transistor MJ11032 que soporta 50A, y además es fácil de encontrar en el mercado local.

El Opam LM358 amplifica la señal de entrada (configurada amplificación directa) de 0-10VDC a 0-22VDC.

El transistor MJ11032 brinda la corriente que requiere el compresor.

Por otro lado, se usa una baja resistencia (R11) en la línea del compresor para sensar la corriente, con el objetivo de verificar su buen funcionamiento. Por último la resistencia R19 y el condensador C3 forman un filtro paso bajo para evitar ruidos de la señal del sensor de corriente.

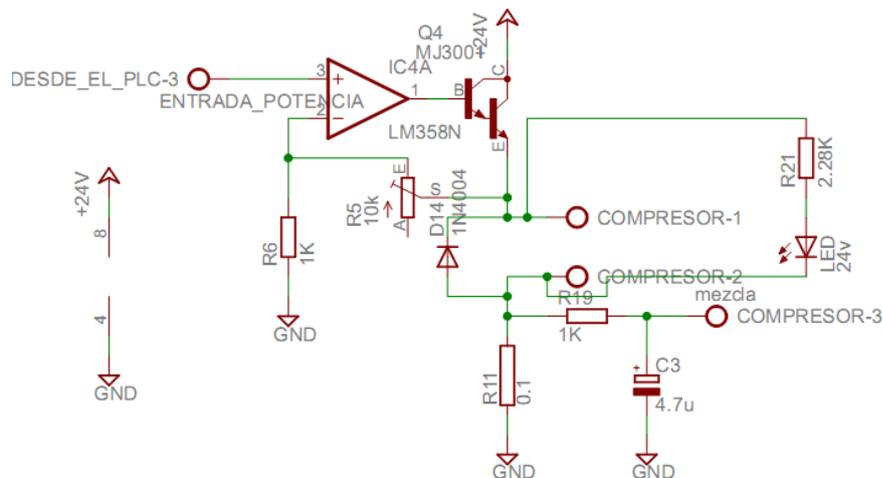


Figura 3.43 Esquemático del acondicionamiento del compresor

3.2.1.2.5 Ventilación anillo térmico

El ventilador necesita 24A hasta 0.4A de corriente. Esta debe ser una señal constante no tendrá un directo control por parte del controlador primario.

Para la alimentación del ventilador no necesita un circuito de adaptación, solo se hace un puente de la fuente hacia el ventilador; pero, para el caso del sensado de las revoluciones del ventilador (propio del ventilador), se hace una etapa de filtro para que pueda llegar al controlador primario mermado de ruido.

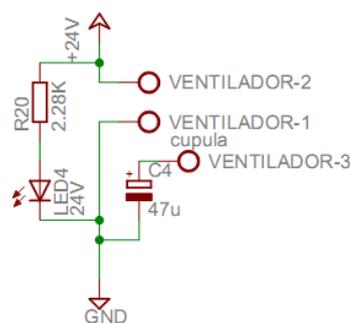


Figura 3.44 Esquemático del acondicionamiento del ventilador

3.2.1.3 Resultados del diseño e implementación del subsistema electrónico

Como resultado del diseño del subsistema electrónico tenemos:

-Módulo de adquisición para: Temperatura del ambiente neonatal, temperatura de seguridad, flujo de mezcla, flujo de oxígeno.

-Módulo de potencia para: Calefactor, seguridad calefactor, compresor, ventilador.

Ambos módulos fueron diseñados (Figura 3.45) e implementados (Figura 3.47) de manera satisfactoria.



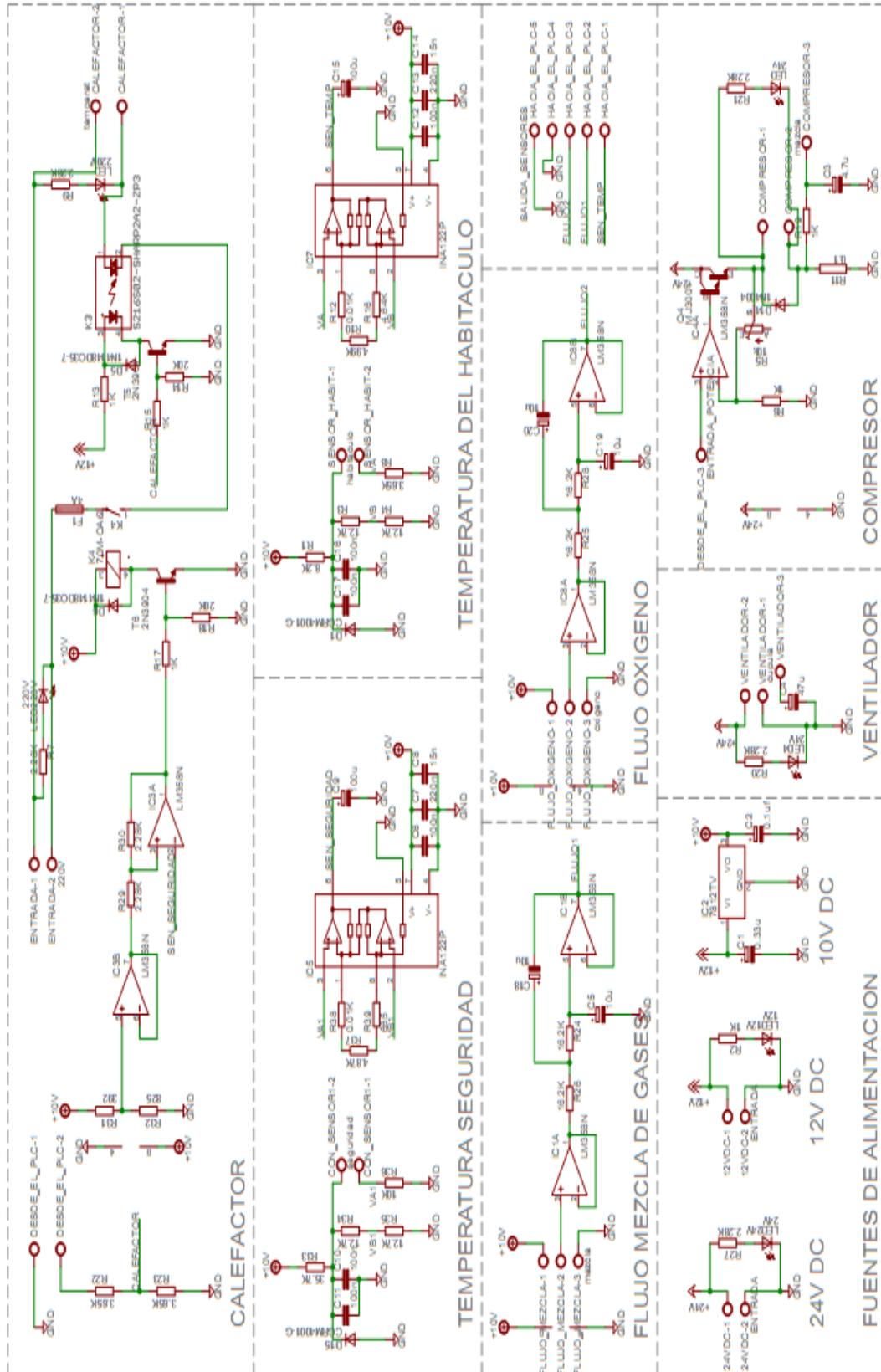


Figura 3.45 Esquemático de la reingeniería del subsistema electrónico diseñado para la BAN-3B

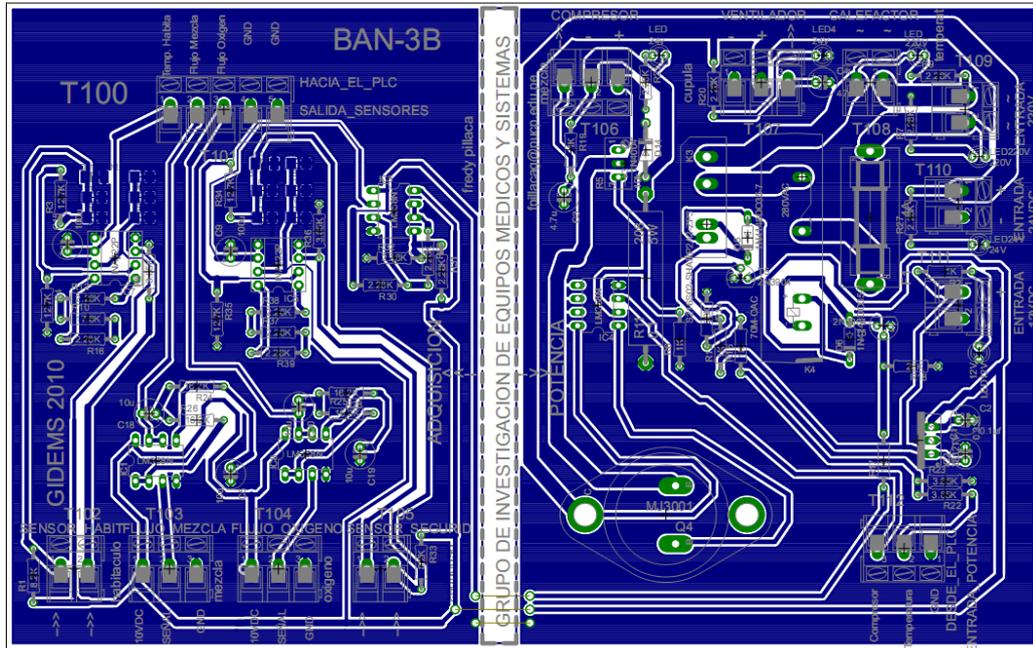


Figura 3.46 Board de la reingeniería del subsistema electrónico diseñado para la BAN-3B

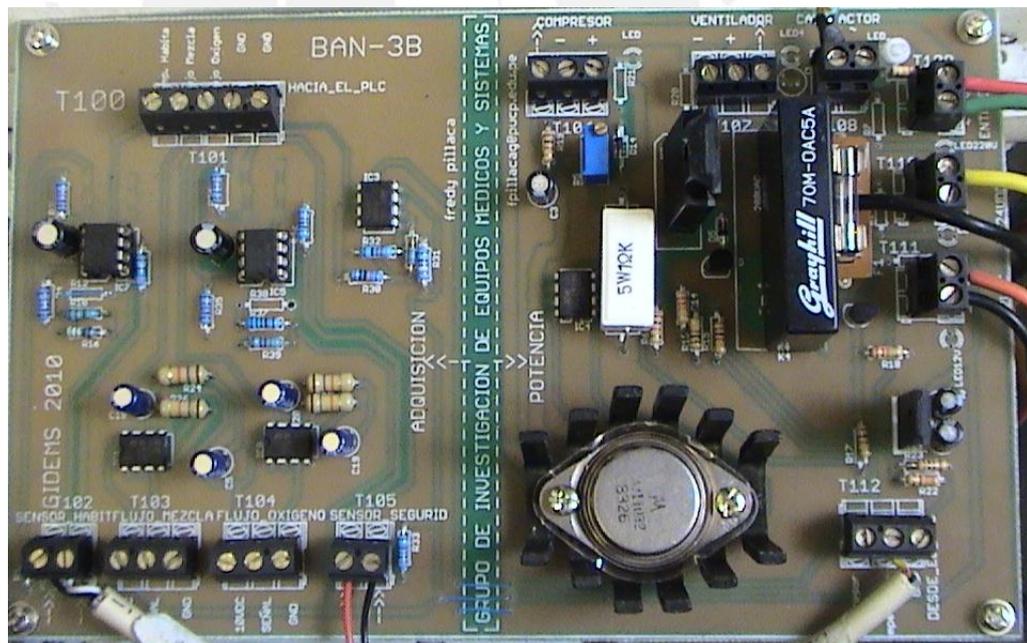


Figura 3.47 Tarjeta electrónica de la reingeniería del subsistema electrónico implementada para la BAN-3B

3.2.2 Obtención de los parámetros del controlador PID

Para aplicar técnicas de sintonización de los controladores PID se utiliza el mismo procedimiento de la fase 1.

3.2.2.1 Etapa 1, prueba del sistema

La curva de reacción del proceso se obtuvo por medio de una prueba de lazo abierto, en la condición mencionada se aplicó una señal tipo escalón en la entrada del sistema y se registran, la señal tipo escalón como la salida del proceso, desde el instante en que se aplicó el escalón de entrada hasta que el sistema alcance un nuevo punto de operación estable.

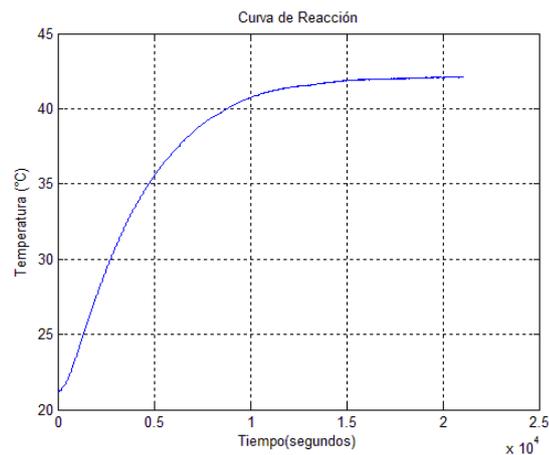


Figura 3.48 Curva de reacción de la prueba de lazo abierto de la fase 2

3.2.2.2 Etapa 2, identificación del sistema

En esta fase se hace uso de la aplicación sistemas de identificación (System Identification Tool) de Matlab 7.1. En la cual ingresamos: Entrada y repuesta de la planta. Esta aplicación brinda el modelo matemático de la planta.

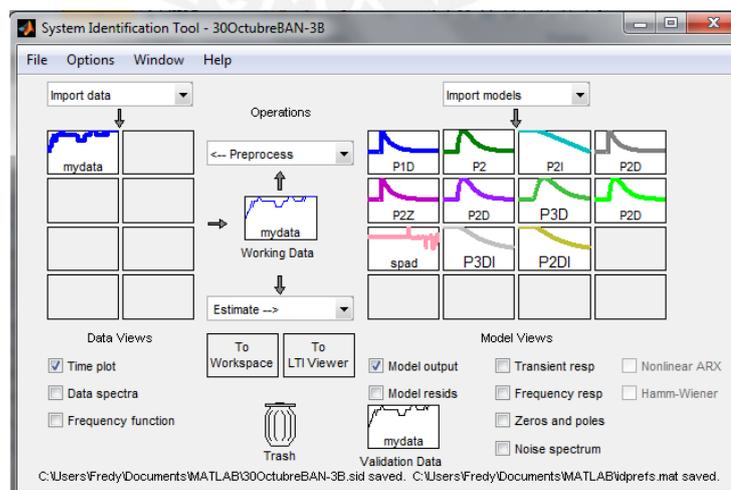


Figura 3.49 Interfaz gráfica de la aplicación Sistemas de Identificación de Matlab

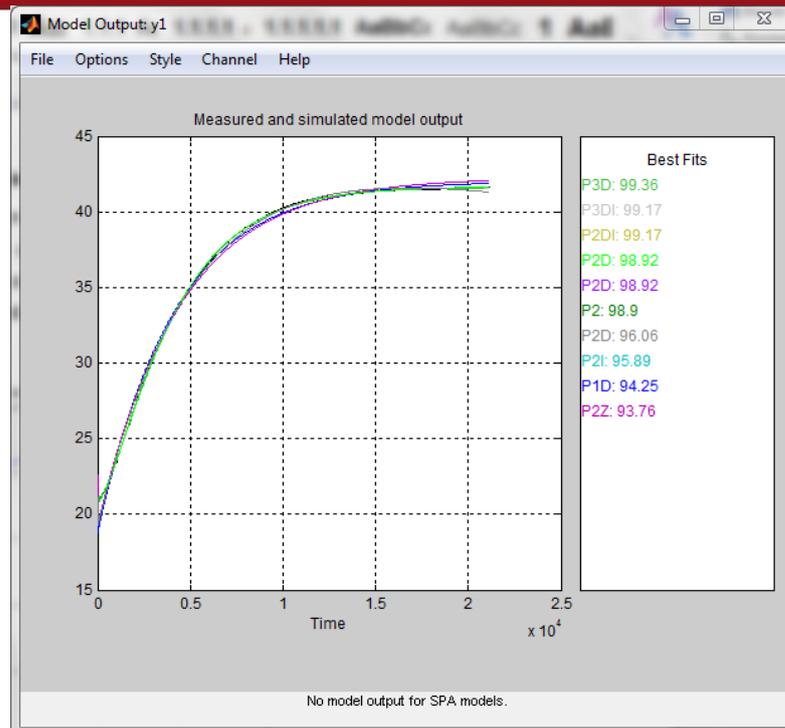


Figura 3.50 Curvas de simulación de los modelos matemáticos aproximados de la planta

En la Figura 3.50, se observa la respuesta a los modelos matemáticos aproximados en la cual se aprecia su porcentaje de similitud. La mejor respuesta lo posee el de 3er orden más tiempo muerto (P3D) 99.36%, por otro lado la función de transferencia de un polo más tiempo muerto (P1D) posee un 94.25%, para efectos de simulación se realiza con la función de transferencia de 3 polos.

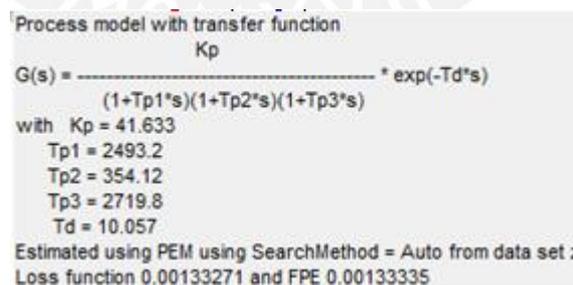


Figura 3.51 Modelo matemático de tres polos más tiempo muerto brindados por MATLAB.

3.2.2.3 Etapa 3, sintonización del sistema

Se halla los valores referenciales del controlador PID, por método de sintonización de Ziegler y Nichols.



Figura 3.52 Curva de reacción fase dos identificando el método de la tangente de Ziegler y Nichols

3.2.3 Diseño e implementación del algoritmo de control

La implementación de algoritmo de control en esta fase es igual a la primera; a excepción del procesamiento de datos sensados. El procesamiento de datos programados, el control de temperatura y la modulación de ancho de pulso es el mismo debido a que no se ha cambiado de PLC. En la Figura 3.53 se muestra el diagrama general del algoritmo de control en el cual se resalta la etapa que tuvo cambios a consecuencia de la reingeniería.

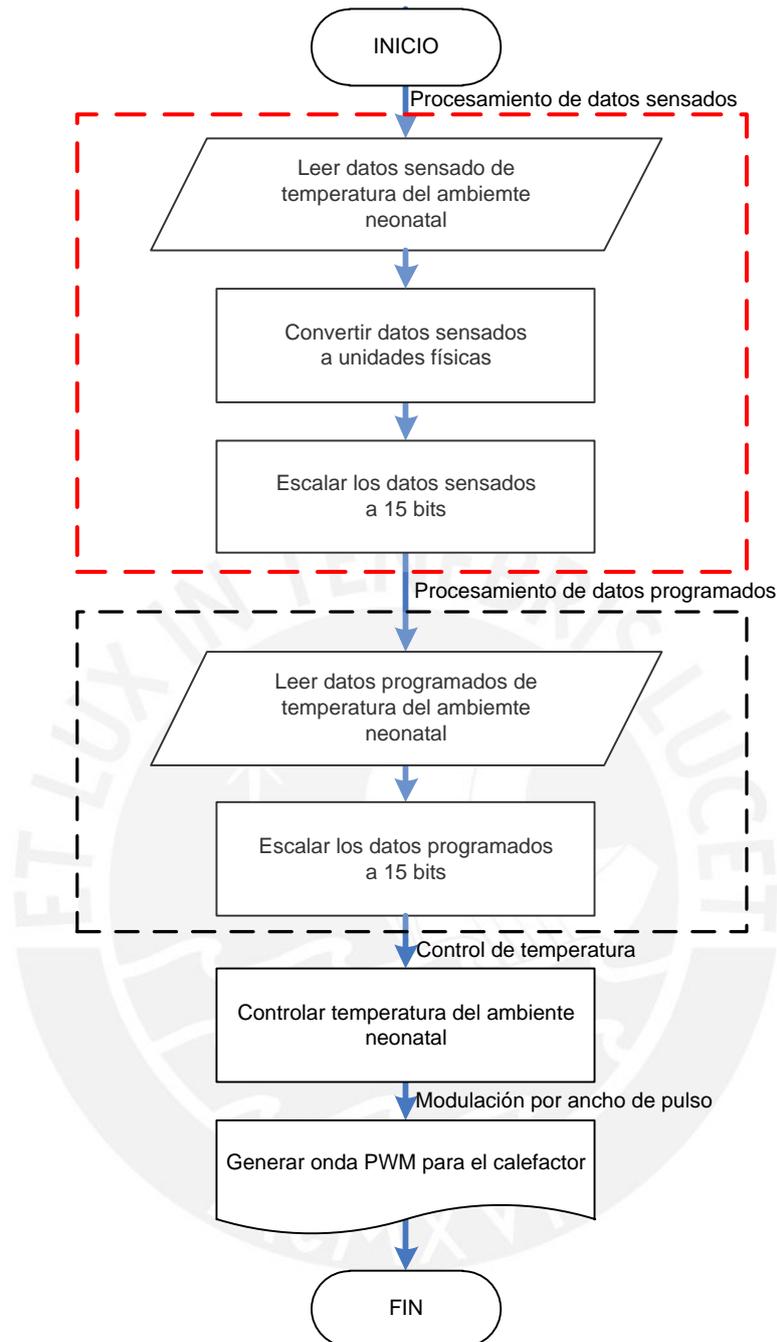


Figura 3.53 Diagrama de bloques general del algoritmo de control fase 2.

3.2.3.1 Módulo de procesamiento de datos sensados

La ecuación con la que se trabajó, fue hallada en el condicionamiento de la temperatura del ambiente neonatal (Figura 3.33).

$$T = 0.1062 \times V^2 + 2.2976 \times V + 14.693$$

Ecuación 3.25

Dónde: T es la temperatura en grados centígrados (°C), y V es el voltaje en voltios.

El PLC Easy821-DC-TCX trabaja con un ADC de 10 bits. La relación para transformar voltios a un número de 10 bits es:

$$B = \left(\frac{1023}{9,99} \right) * V$$

Ecuación 3.26

Dónde: B es un número de 10 bits, y V es el voltaje en voltios.

Utilizando las ecuaciones 3.25 y 3.26 obtenemos:

$$T = 0.000010127546 \times V^2 + 0.0224369 \times V + 14.693$$

Ecuación 3.27

Las operaciones con las que cuenta, sólo operan números enteros de hasta 32 bits (31 bits, más 1 bit para el signo). Entonces, se decide escalar los valores de los coeficientes por 10^n , donde "n" es un número que posteriormente determinaremos. Primero, se trabajó con los términos lineales de la ecuación y luego se analizó el término cuadrático. Así, con la siguiente parte de la ecuación:

$$T = 0.0224369 \times V + 14.693$$

Ecuación 3.8

Se obtiene la Tabla:

Tabla 3.6 Valores del rango lineal de la ecuación temperatura vs valor digital del ADC de la fase 2

Entrada del ADC, 10 bits	Temperatura, °C	Valor (Ecuación 3.28)	Valor * FACTOR
0	14.693	14693	146930000
30	15.375224	15375.215	153752240
32	15.4213538	15421.34368	154213537.6
162	18.593577	18593.36708	185935770.4
420	25.903028	25901.666	259030280.3
624	32.6370949	32634.11072	326370948.9
700	35.3613791	35357.63	353613790.8
928	44.2361921	44229.62528	442361921.1
960	45.5660411	45559.016	455660410.8
1014	47.8571936	47849.36012	478571935.6

Valor de $2^{31}-1$	2147483647,00
---------------------	---------------

FACTOR (10^7)	10000000
-------------------	----------

Donde, el máximo número n al cual se puede elevar el número 10, para obtener el factor, es 7 (debido a que con un ocho se obtendría como valor máximo 4 785719356, el cual excede el máximo permitido, $2^{31}-1 = 2\ 147\ 483\ 647$).

Luego, se procede a analizar el término cuadrático. Al multiplicar su coeficiente con el factor obtenemos el valor: 101.275.

Ahora, como la entrada del ADC es de 10 bits, y se quiere aprovechar las operaciones con números de 31 bits (más 1 que es el signo), se tiene la siguiente relación:

$$2^{10} \times 2^{10} \times \text{Coeficiente } e \leq 2^{31} - 1 \quad \text{Ecuación 3.29}$$

Donde, coeficiente permite un número máximo de $2^{11}-1$ (2047).

Con esta información podríamos multiplicar el coeficiente cuadrático por 10, con la finalidad de tener mayor precisión. Así, nuestro coeficiente cuadrático quedaría en 1012.

Finalmente, tenemos la siguiente ecuación que se implementará en el PLC:

$$T = \frac{\left[\frac{1012 * B^2}{10} \right] - 224369 * B + 146930000}{10^4} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

3.2.4 Ensayos y reajuste fase 2

3.2.4.1 Paso 1: Implementación y verificación primer prototipo

Una vez implementado el algoritmo de control después de la reingeniería, se realizaron pruebas en simulink. Y se realizaron pruebas a la planta.

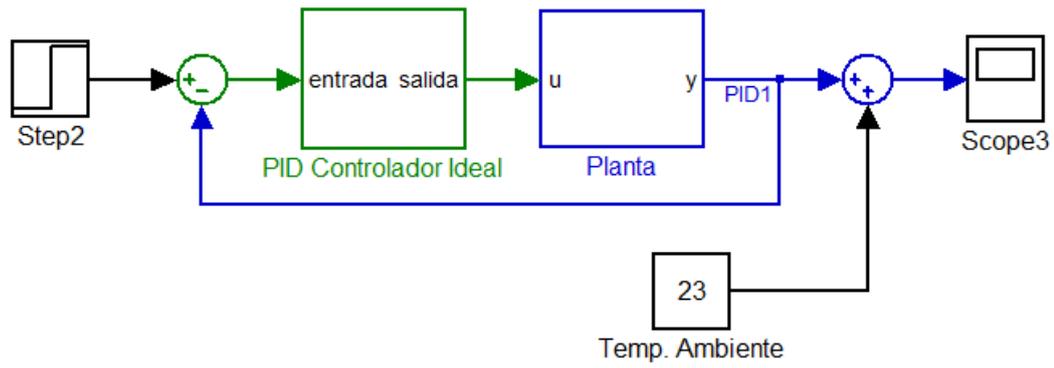


Figura 3.54 Diagrama de bloques en simulink de la planta, fase 2

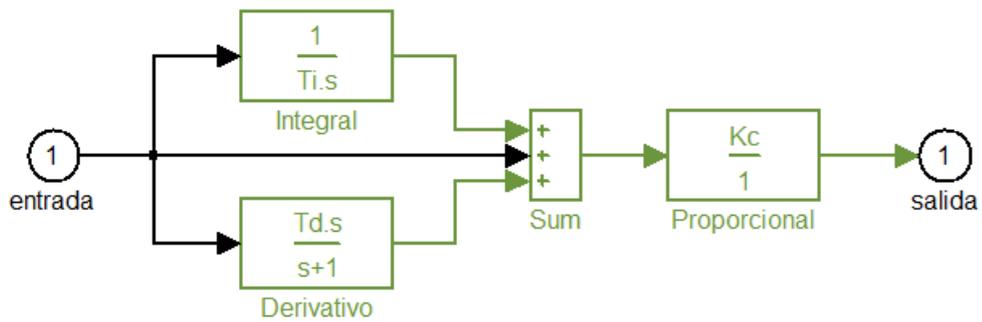


Figura 3.55 Diagrama de bloques en simulink para el controlador PID ideal

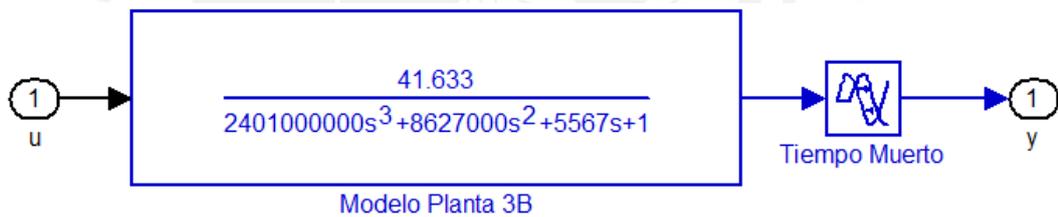


Figura 3.56 Diagrama de bloques en simulink de la planta BAN-3B

El primer prototipo de control se dio con un controlador Proporcional, los valores del controlador probado se concluyeron de la etapa de identificación y sintonización expuesta previamente ($P = 4$).

Temperatura programada = 28 °C

Temperatura de ambiente = 21.2 °C

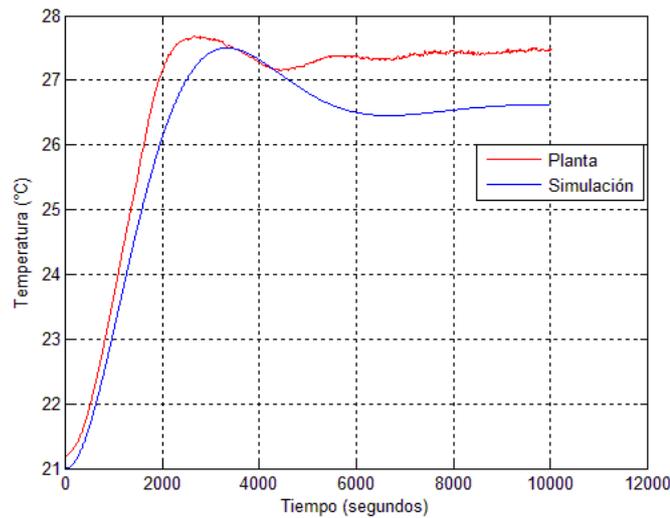


Figura 3.57 Resultados de control proporcional, con ganancia 4

En la Figura 3.57 se tiene 2 curvas: simulación en SIMULINK y la respuesta de la planta para el controlador; se observa que ambas tienen un error de setpoint, Además la respuesta de la planta es oscilatoria por ende buscamos otra ganancia. También, se observa un parecido entre la simulación y la respuesta real de la planta.

El segundo prototipo de control se dio con un controlador Proporcional, con menor ganancia con el fin de no hacer oscilar ($P=2.5$).

Temperatura programada = 37 °C

Temperatura de ambiente = 32.5 °C

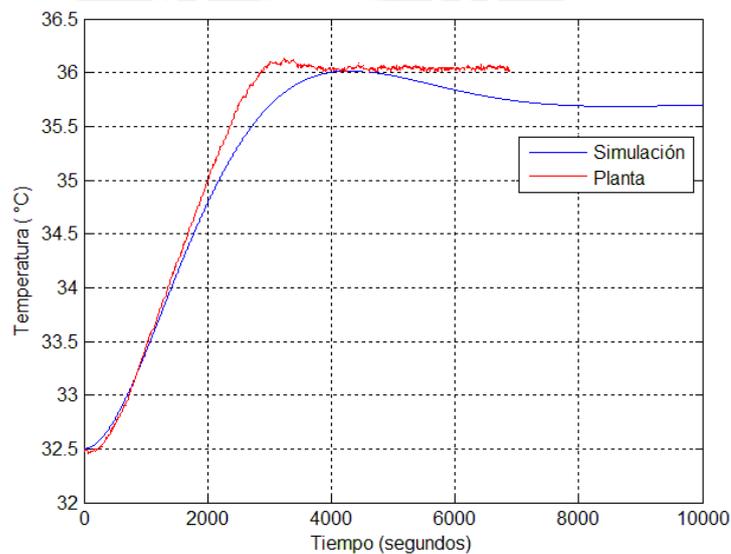


Figura 3.58 Resultados de control proporcional, con ganancia 2.5

En la Figura 3.58 la respuesta de la planta ya no posee oscilación pero todavía tiene error de setpoint. Por tanto, necesita de una variable integral para eliminar el error en estado estacionario.

El tercer prototipo de control se dio con un controlador Proporcional Integral ($P=2.5$, $I=4000$).

Temperatura programada = 31 °C

Temperatura de ambiente = 23 °C

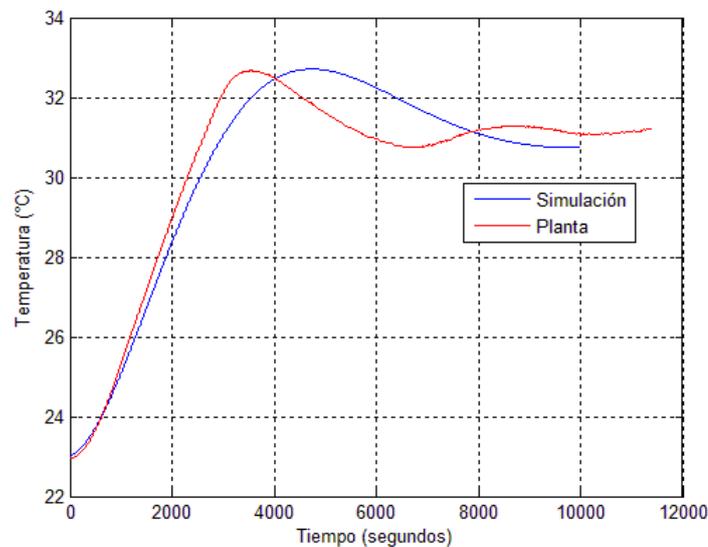


Figura 3.59 Resultados del control PI, $P=2.5$ y $I=400$

Prueba realizada para un PI. Se observa claramente que existe un sobreimpulso de 1.4 °C, con el fin de evitar este sobreimpulso se fusiona 2 controladores que actúen en situaciones distintas.

3.2.4.2 Paso 2: Implementación y verificación segundo prototipo

La estrategia de control consiste en la acción de 2 controladores, en la primera etapa se usará un controlador netamente proporcional de ganancia alta ($P=4$) para posteriormente actuar el controlador PI. Esta estrategia se hace con el fin de evitar la saturación de la acción integral, lo cual conlleva a un sobreimpulso, observada en la Figura 3.59. Además esta estrategia disminuye el tiempo de subida, lo cual es favorable.

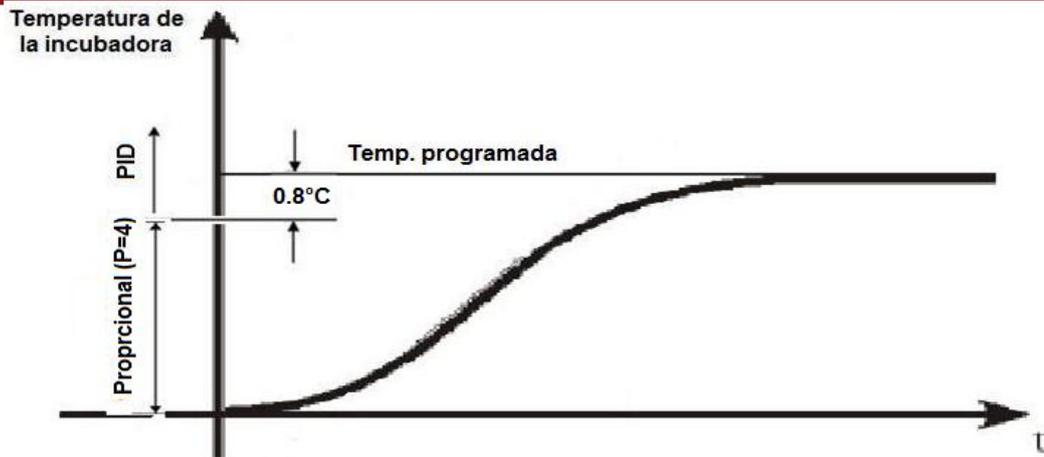


Figura 3.60 Estrategia de control de fusionar 2 controladores

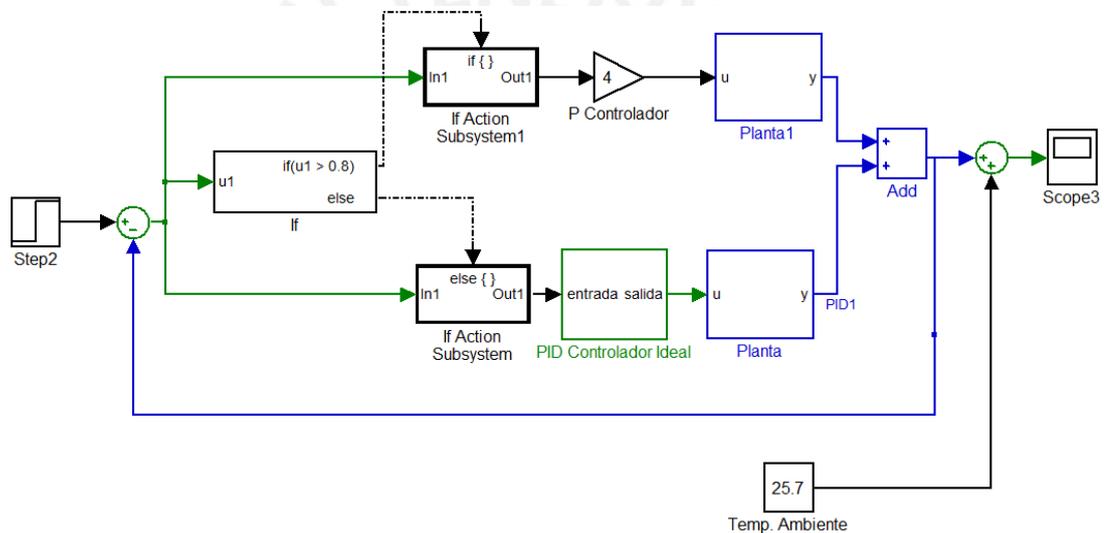


Figura 3.61 Diagrama de simulación, bloques, con la estrategia de usar 2 controladores

En la Figura 3.61, se aprecia el diagrama de bloques de la estrategia de control (fusionando 2 controladores) para poder simularlo en SIMULINK.

Controlador Proporcional Integral, (P=2.5, I=4000).

Temperatura programada = 33 °C

Temperatura de ambiente = 29 °C

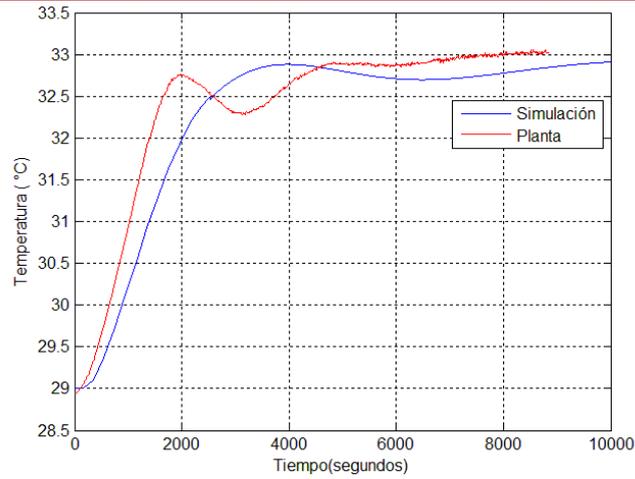


Figura 3.62 Resultados del control PI, $P=2.5$ y $I=400$, con la estrategia de control

En la Figura 3.62 se observa que antes de llegar al setpoint existe oscilaciones por tanto se le adicionara la constante derivativa para evitar dichas oscilaciones.

Controlador Proporcional Integral Derivativa, ($P=2.5$, $I=4000$, $D=400$).

Temperatura programada = 33 °C

Temperatura de ambiente = 28.4 °C

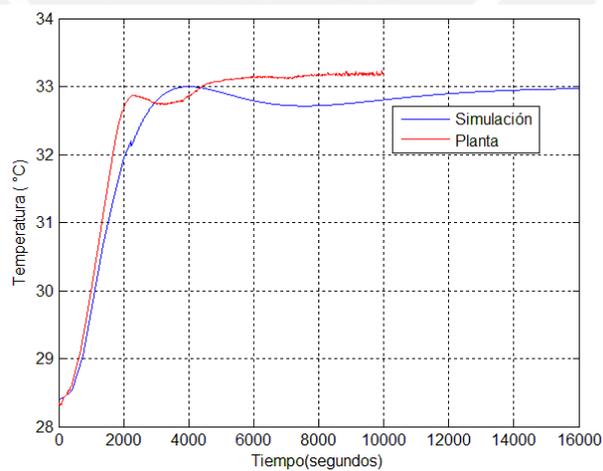


Figura 3.63 Resultados del control PID, $P=2.5$, $I=4000$, $D=400$

En la Figura 3.63, se observa, la respuesta mejoró en las oscilaciones, por tanto se podría seguir aumentando acción derivativa para evitar las oscilaciones, pero esto conllevaría a un aumento del tiempo de establecimiento.

Entonces lo que se necesita es de más acción integral, cambiamos de $T_i=4000$ a $T_i=3000$ (PID ideal, T_i inversamente proporcional a la acción integral, Figura 3.55).

Controlador Proporcional Integral Derivativa, ($P=2.5$, $I=3000$, $D=400$).

Temperatura programada = $28\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de ambiente = $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$

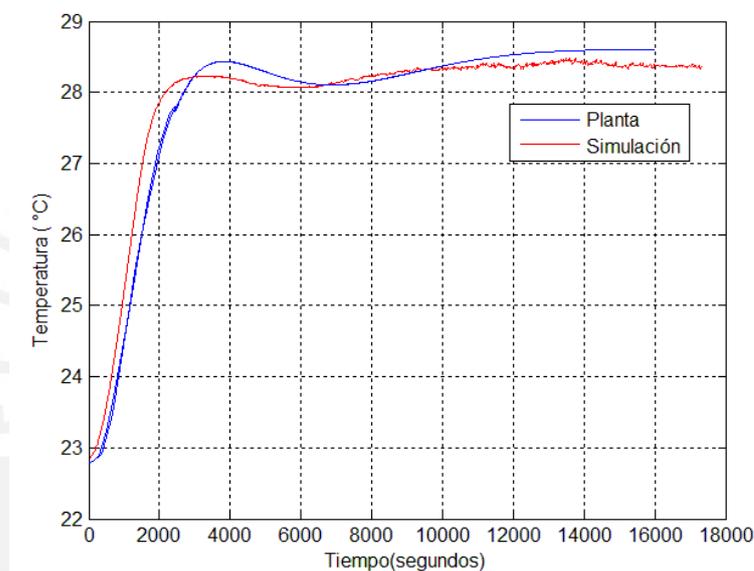


Figura 3.64 Resultados del control PID, $P=2.5$, $I=3000$ y $D=400$

En la Figura 3.64, se observa que desapareció la oscilación antes de llegar al setpoint, pero aumentó el tiempo de establecimiento, esto se debe a la alta acción de la componente derivativa, por tanto se decide primero buscar la acción proporcional e integral adecuada antes de encontrar la componente derivativa.

3.2.4.3 Paso 3: Implementación y verificación tercer prototipo

Controlador Proporcional Integral Derivativa, ($P=2.5$, $I=2500$).

Temperatura programada = $28\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura de ambiente = $23\text{ }^{\circ}\text{C}$

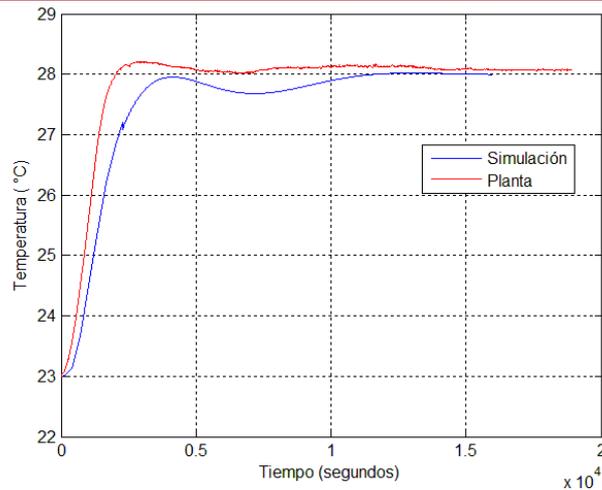


Figura 3.65 Resultados del control PID, P=2.5, I=2500

Observamos claramente que se la respuesta a mejorado enormemente, entonces se concluye que estas constantes proporcional e integral, son las que mejor se adecuan al sistema, por tanto ahora solo queda añadirle una acción derivativa baja para quitar esa oscilación diminuta que se observa.

Por tanto se decide aumentarle una acción derivativa.

Controlador Proporcional Integral Derivativa, (P=2.5, I=2500, D=50).

Temperatura programada = 28 °C

Temperatura de ambiente = 23,2 °C

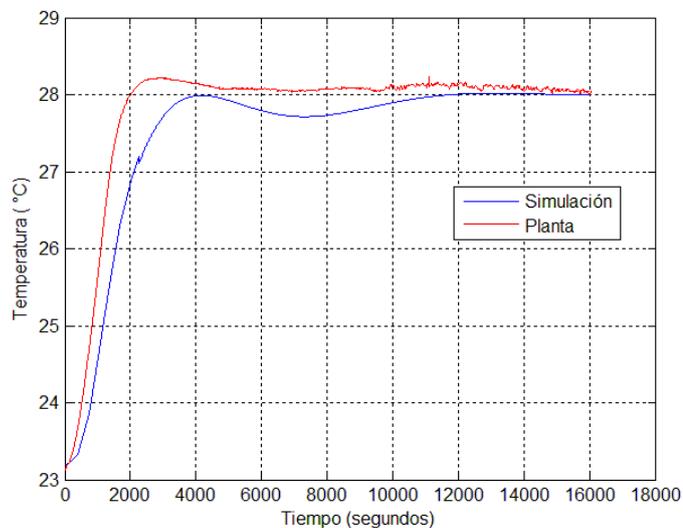


Figura 3.66 Resultados del control PID, P=2.5, I=3000 y D=50

Observamos con la adición de la acción integral ha disminuido considerablemente la oscilación en el segundo pico, pero se puede llegar a obtener mejores resultados, por tanto se decide aumentar la acción derivativa.

Controlador Proporcional Integral Derivativa, (P=2.5, I=2500, D=120).

Temperatura programada = 28 °C

Temperatura de ambiente = 22,3 °C

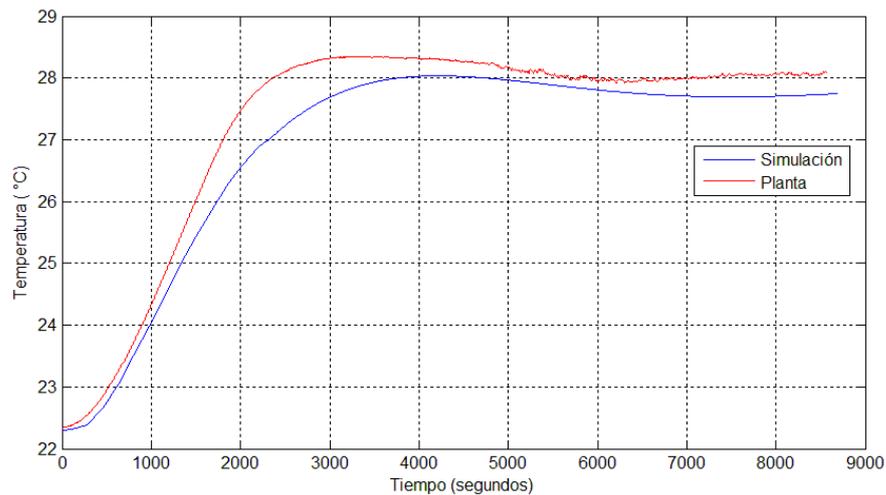


Figura 3.67 Resultados del control PID, P=2.5, I=3000 y D=120

Finalmente se observa la oscilación en el segundo pico, ya prácticamente ha desaparecido, entonces se concluye que estas son las acciones del controlador PID, finales. **P=2.5, I=2500, D=120**. En la Figura 3.68, se observa una prueba del controlador de la planta para 2 puntos de referencia 28, 29 °C.

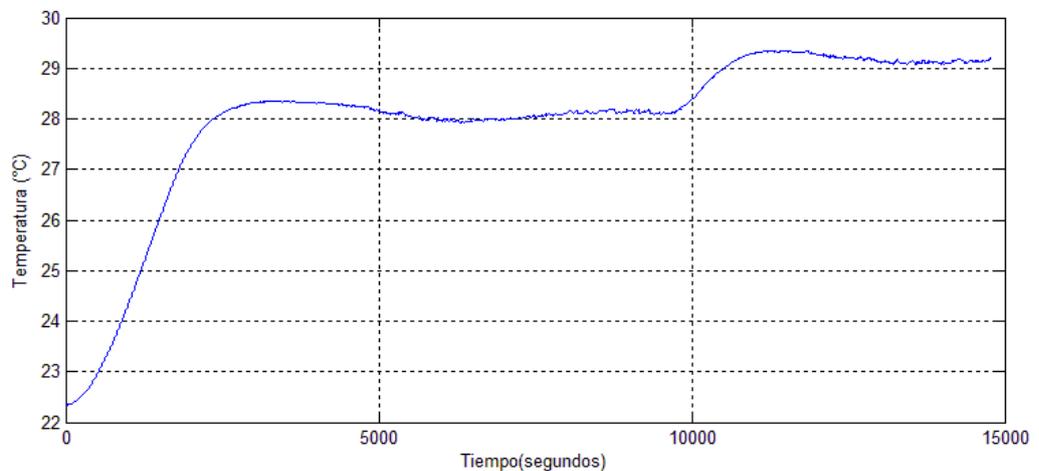


Figura 3.68 Resultados del controlador final para 2 setpoint distintos

Se comprobó el control de temperatura (Figura 3.70), con un sistema de medición de temperatura para incubadoras, que previamente fue calibrado con el patrón Ertco – Eutechnics 4400 con una resolución de 0.01 °C y una precisión de $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$ Figura 3.69.

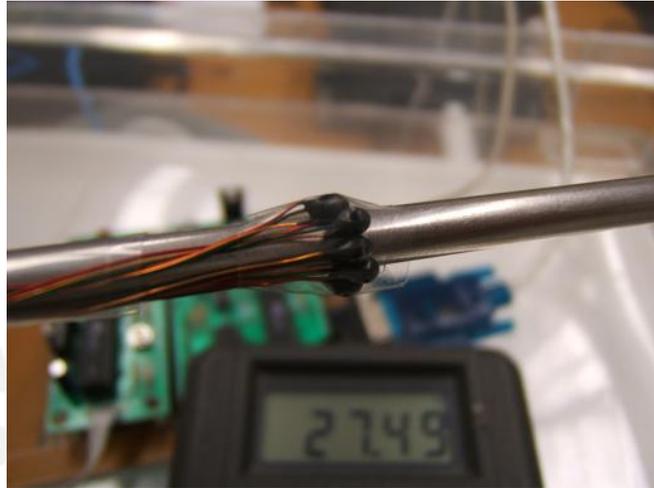


Figura 3.69 Sensores calibrándose con el patrón Ertco-Eutechnics. 4400 con resolución de 0.01°C y una precisión de $\pm 0.015^{\circ}\text{C}$



Figura 3.70 Interfaz gráfica de un sistema electrónico que permite medir y evaluar la distribución de temperaturas en incubadoras neonatales [37], comprobando la curvas temperatura vs tiempo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En la fase 1,

El control de temperatura de la Burbuja Neonatal 3B en esta fase fue aceptable, el algoritmo de control posee un control PID cuyos coeficientes de sintonización en un primer momento son $P=4$; $I=2233.7$; $D=361.5$ y luego son: $P=0.13$; $I=2233.7$; $D=361.5$; esto con el fin de reducir el tiempo de subida.

El tiempo de calentamiento es 65 minutos, con una estabilidad térmica menor a ± 0.11 °C, (Figura 4.1).

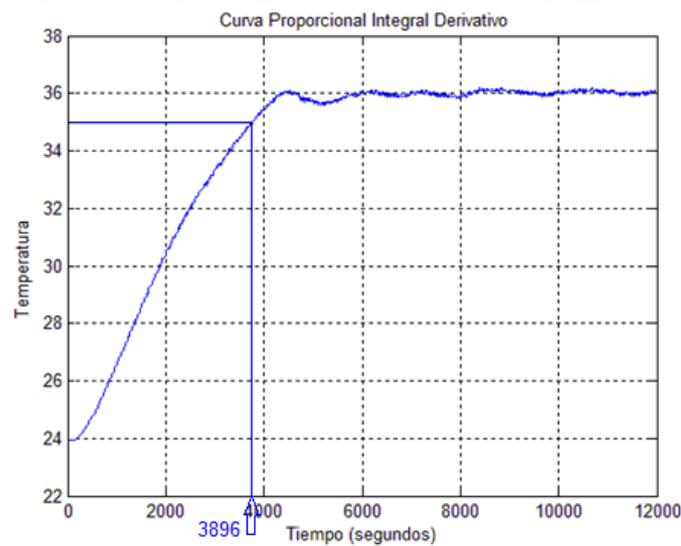


Figura 4.1: Respuesta del control de temperatura de la fase 1 brindado por nuestro sensor de control.

En la fase 2,

El resultado final es el control de temperatura de la Burbuja Neonatal 3B implementado exitosamente, el algoritmo de control actualmente posee 2 tipos de controles (P, PID), En un primer momento actúa el controlador proporcional ($P=4$) y luego actúa el controlador PID ($P=2.5$; $I=2500$; $D=120$); esto con el fin de reducir el tiempo de subida y obtener una mejor respuesta. De esta manera es posible cumplir con los requerimientos de control de temperatura según norma IEC 60601-2-19 sección ocho ítem 50, apartados 101 y 108; donde el tiempo de calentamiento es 63.2 minutos lo cual es menor al exigido 90 minutos, con una estabilidad térmica menor a ± 0.08 °C, menor a la norma ± 0.5 °C (Figura 4.2).

Programación de control de temperatura según norma IEC 60601 (Figura 2.2).

Temperatura programada = 25 °C

Temperatura de ambiente = 23.2 °C

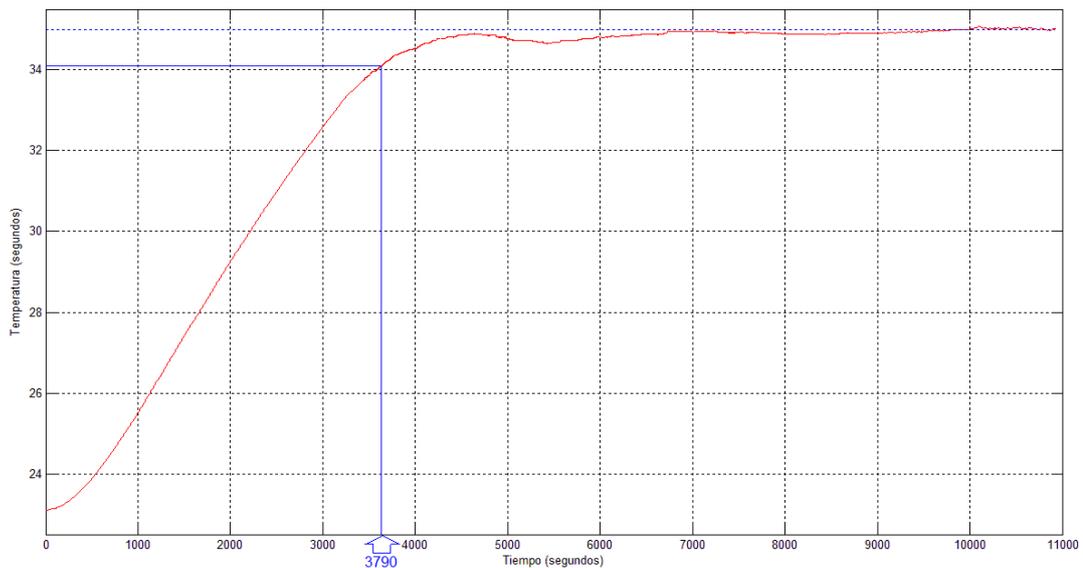


Figura 4.2 Resultado final del control de temperatura brindado por nuestro sensor de control.

También se realizaron pruebas para otros casos de programación:

Temperatura programada = 28 °C

Temperatura de ambiente = 22.4 °C

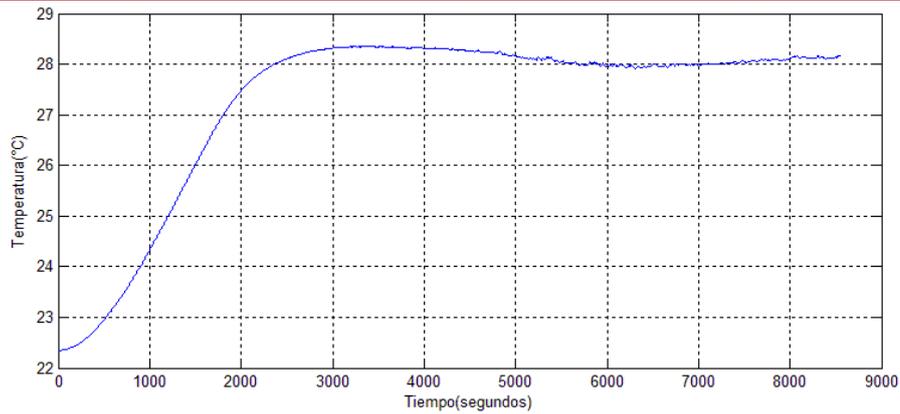


Figura 4.3 Respuesta final del control de temperatura considerando referencia de 28 °C.

En la Figura 4.3 se observa el resultado para una programación distinta a la pedida por la norma IEC 60601. Los siguientes resultados mostrados son para distintos puntos de programación, con estas gráficas observamos la robustez del controlador PID presentado.

Temperatura programada = 33 °C

Temperatura de ambiente neonatal = 35 °C

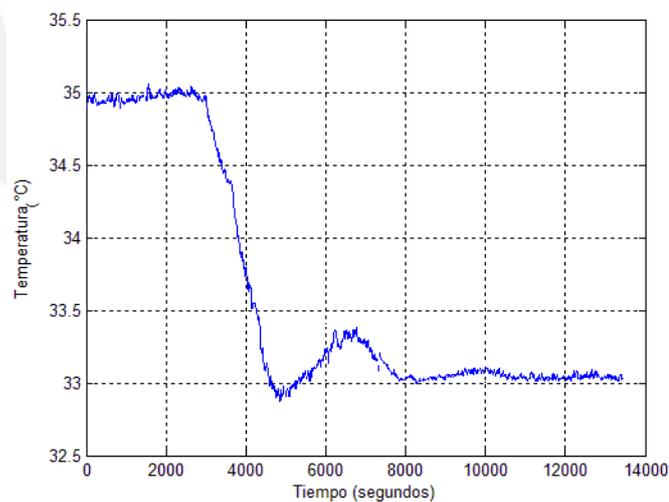


Figura 4.4 Respuesta final del control de temperatura considerando referencia de 33°C

En la Figura 4.4 se observa, una programación por debajo de la temperatura del habitáculo.

Temperatura programada = 28 a 33 °C

Temperatura de ambiente = 22.5 °C

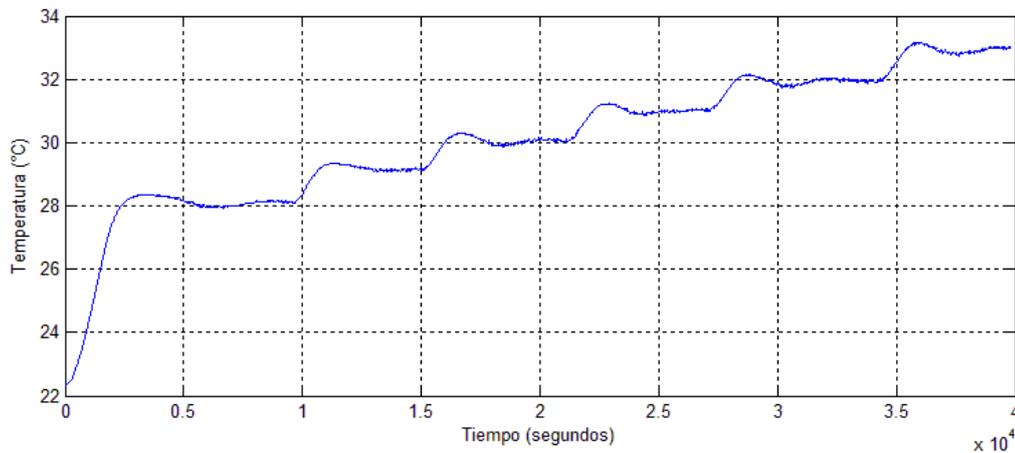


Figura 4.5 Respuesta final del control de temperatura para distintos setpoint.

En la Figura 4.5 se observa, la repuesta del control de temperatura considerando distintos puntos de referencia 28, 29, 30, 31, 32, 33 °C. Además se realizó la verificación del control de temperatura con un sistema de medición para incubadoras que previamente fue calibrado, Figura 3.69.

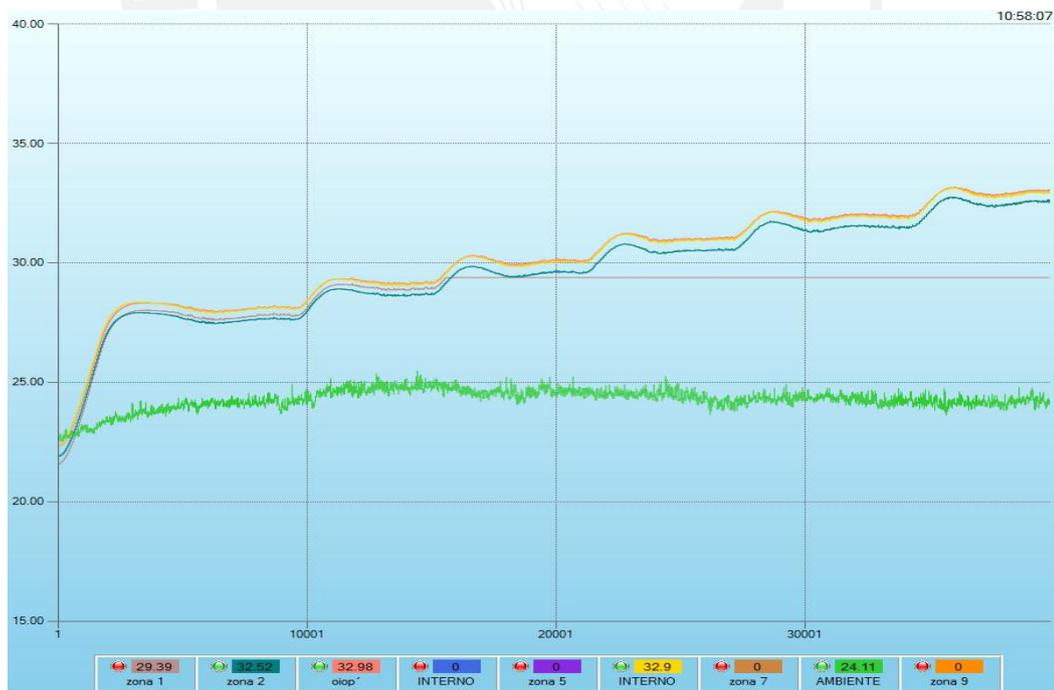


Figura 4.6 Interfaz gráfica de un sistema electrónico que permite medir y evaluar la distribución de temperaturas en incubadoras neonatales [37], verificando la curva del control de temperatura para distintos setpoint.

En la Figura 4.6 se observa el desempeño del controlador, mediante sensores (ajenos al sistema de control) ubicados en los extremos medios del habitáculo neonatal.

Otros Resultados,

La reingeniería del subsistema electrónico para la Burbuja Neonatal 3B fue diseñado e implementado exitosamente, como se muestran en las Figura 4.7 Figura 4.8.

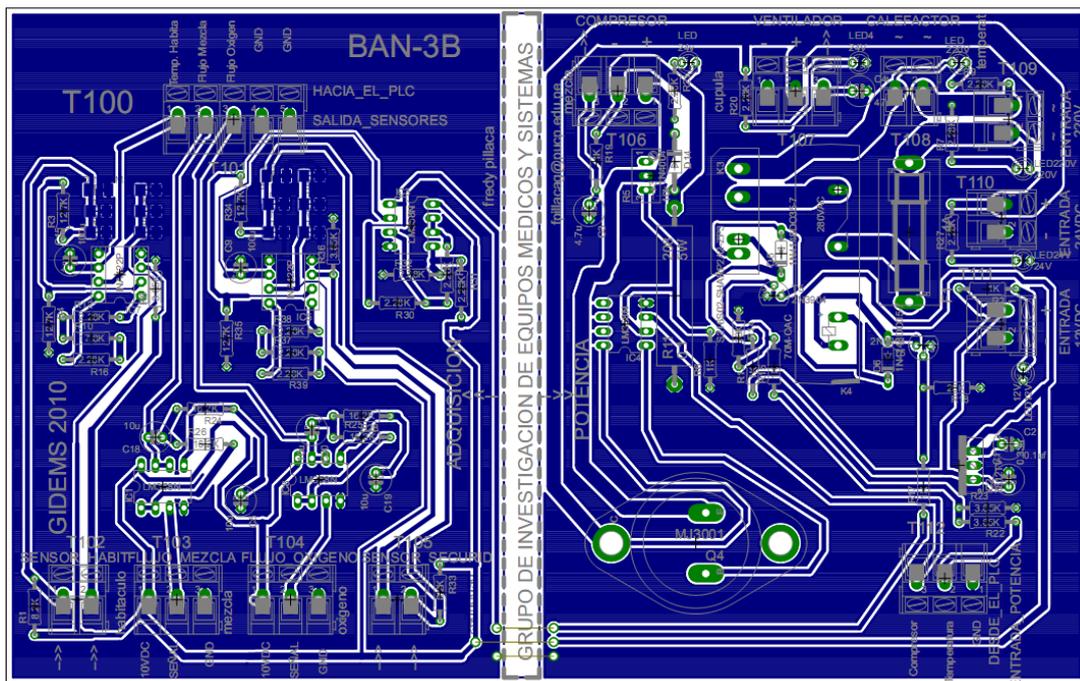


Figura 4.7 Diseño del subsistema electrónico para la BAN-3B

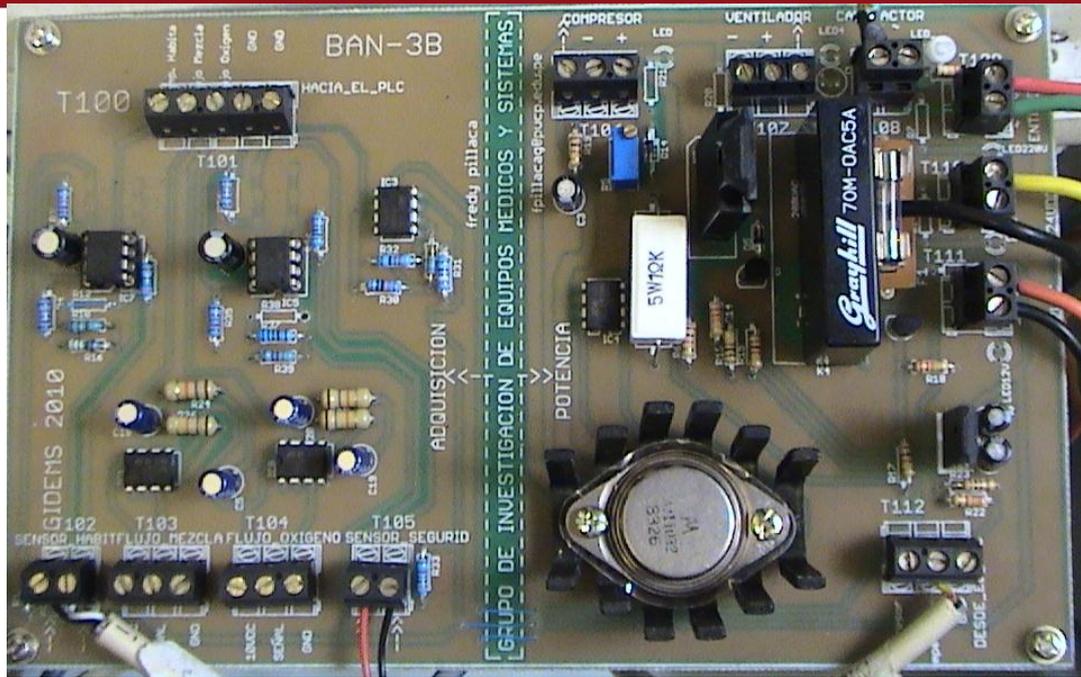


Figura 4.8 Tarjeta electrónica de la Burbuja Neonatal 3B, interactuando con sus sensores y actuadores

En la Figura 4.9 se observa la seguridad del control de temperatura que se desarrolló en la reingeniería de la Burbuja Neonatal 3B.

Para verificar se le dio al sistema un PWM del 100%, se observa la curva de la temperatura del habitáculo la cual no paso los 40°C.

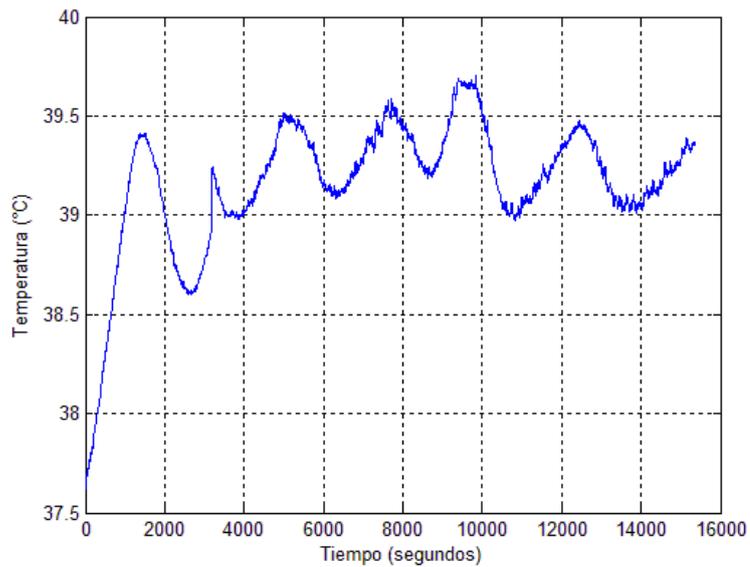


Figura 4.9 Curva temperatura vs tiempo verificando la seguridad del control de temperatura

CONCLUSIONES

Del desarrollo de un control de temperatura para la Burbuja Neonatal 3B, se desprenden las siguientes conclusiones relevantes:

El control de temperatura implementado en la Burbuja Neonatal modelo 3B cumplió satisfactoriamente con la norma (IEC 60601-2-19 sección ocho ítem 50, apartados 101 y 108). Donde el tiempo de calentamiento es 63.2 minutos lo cual es menor al exigido 90 minutos, con una estabilidad térmica menor a ± 0.08 °C, menor a la norma ± 0.5 °C. Pese a que se tuvo que realizar la reingeniería total del subsistema electrónico de la Burbuja Neonatal 3B, en donde fue exitosa la construcción de la tarjeta de adquisición y potencia.

En cuanto a la obtención de los parámetros del controlador PID, se logró encontrar un modelo de tercer orden más tiempo muerto de la planta y comprobar su respuesta a cambios en el valor deseado ya que se aproximó bien el comportamiento real del equipo. Cabe resaltar que el modelo obtenido tiene una aproximación del 99.36% a comparación con un modelo de segundo y primer orden los cuales nos brindaron una aproximación de 98.92% y 94.25% respectivamente.

Se pudo comprobar que el método de identificación escogido no fue el óptimo, dado que la sintonización preliminar escogida, no dio los resultados esperados. Finalmente con los conceptos obtenidos se realizó una sintonización más profunda, llegando a los resultados presentados.

Se diseñó e implementó el algoritmo de control de temperatura en el PLC EASY 821-DC-TCX en lenguaje ladder con el programa EASY-SOFT PRO propiedad de Moeller y la ayuda de los bloques: PID, modulación por ancho de pulso, escalamiento de valores, aritmética, tiempo de ciclo teórico, módulo de datos, comparador, multiplexor de datos, relé de contaje y salto condicional; estos 5 últimos bloques nos ayudaron a realizar la estrategia de control el cual consiste en usar 2 controladores P, PID para el control de temperatura.

RECOMENDACIONES

Para hallar el modelo de la planta es recomendable utilizar la aplicación identificación de sistemas de MATLAB, porque la identificación por el método de la tangente de Ziegler y Nichols no te brinda un modelo aproximado debido a que son esencialmente métodos gráficos manuales.

La obtención de los parámetros del controlador PID por métodos de sintonización, no necesariamente son los esperados. Por el contrario, si te ayudan a obtener una referencia aproximado de los valores finales.

El método de identificación y sintonización utilizado en esta investigación, fue elegido, entre otras cosas, por la facilidad que dan para hallar el modelo de la planta. Existen muchos métodos que han quedado fuera de esta investigación y sería importante, someterlos a un análisis.

Con una sintonización fina del controlador PID se pueden llegar a mejores resultados, debido que la sintonización no es única.

Las simulaciones en la reingeniería: comparación por histéresis, filtro pasabajos y modelo matemático de la planta BAN-3B son útiles porque brinda un acercamiento a la realidad.

Los resultados del proyecto son muy importantes, pues permitirá a médicos neonatólogos realizar ensayos preclínicos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] 2004 "PREVENTING HYPERTHERMIA DECREASES BRAIN DAMAGE FOLLOWING NEONATAL-ISCHEMIC SEIZURES."
ager JY, Armstrong EA, Jaharus C, Saucier DM, Wirrell EC. 48–57.
- [2] 2005 "CHANGES IN BODY TEMPERATURE AFTER BIRTH IN PRETERM INFANTS STABILISED IN POLYTHENE BAGS."
Smith CL, Quine D, McCrosson F, Armstrong L, Lyon A, Stenson B. "Changes in body temperature after birth in preterm infants stabilised in polythene bags."
Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed 2005, F444.
- [3] 2005 "INTERVENTIONS TO PREVENT HYPOTHERMIA AT BIRTH IN PRETERM AND/OR LOW."
McCall EM, Alderdice FA, Halliday HL, Jenkins JG, Vohra S. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2005, no. CD004210 (2005).
- [4] 2003 "PREVENTING HYPOTHERMIA AT BIRTH IN PRETERM BABIES: AT A COST OF OVERHEATING SOME?"
Newton T, Watkinson M. *Dis Child Fetal Neonatal*, 2003: F256.
- [5] 1993 "SEQUENTIAL TRIAL OF THE NONTHERMAL EFFECT OF ATMOSPHERIC HUMIDITY ON SURVIVAL OF HUMAN INFANTS OF LOW BIRTH WEIGHT."
Silverman WA, Agate FJ, Fertig JW. A. 710–724. 1993.
- [6] 1998 "THE INFLUENCE OF THE THERMAL ENVIRONMENT UPON SURVIVAL OF NEWLY BORN PRETERM INFANTS."
Silverman WA, Fertig JW, Berger AP. 876–885.
- [7] 2009 *GIDEMS INGENIERIA NEONATAL*.
Castillon, Bruno.
<http://www.pucp.edu.pe/grupo/gidems/> (accessed Junio 4, 2009).
- [8] 2007 "EUROPA PATENT EP1380276".
Bruno Castillon, Ajito.
- [9] 2005 " PATENT US6884211B2. 2005"
Bruno Castillon, Eduardo Ajito.

- [10] 1994 "SISTEMA DE CONTROL DIGITAL PARA INCUBADORA Y MONITOREO DE TEMPERATURA CORPORAL DE NEONATOS ."
Carranza de la Cruz, Cesar Alberto. PUCP.
- [11] 2008 " *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO DE CONTROL DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA, PESO Y DE LA INTERFASE DE USUARIO PARA UNA INCUBADORA DE BEBES* "
Cuentas Larroca, Martín Ricardo.
- [12] 2006 " *DESARROLLO DEL SOFTWARE DEL SISTEMA EMBEBIDO DE LA BURBUJA ARTIFICIAL NEONATAL* "
Montalvo Barrios, Andrés. PUCP.
- [13] 2009 "APPARATUS AND METHOD FOR ANALYSING A BIOLOGICAL SAMPLE IN RESPONSE TO MICROWAVE RADIATION "
" PETENT US 20090269836A1"
Oxon Norman, Brian Ellison.
- [14] 2009 "APPARATUS OF MAKING AND STORAGE OF YOGURT WITH THERMOELECTRIC TECHNOLOGY"
" PETENT US 20090260527A1"
Monroe Township, Yushen Qian.
- [15] 2010 "CENTIMETER-SCALE, INTEGRATED DIAGNOSTICS INCUBATOR FOR BIOLOGICAL CULTURING"
" PETENT US 20100151571A1"
Ari Glezer, Jelena Vukasinovic.
- [16] 2005 "ACTUALIZACION DE TEMAS NEONATALES ."
Norberto Santos, et.
- [17] 1998 "ENCYCLOPEDIA OF MEDICAL DEVICES AND INSTRUMENTATION."
J. G. Webster, Ed. John Wiley & Sons Inc. 1643-1656. USA.
- [18] 1998 "MEDICAL INSTRUMENTATION. APPLICATION AND DESIGN", J. G. Webster ED. JOHN WILEY & Sons Inc.
"Medical Instrumentation Application and Design." 607-609. 1998.
- [19] 1986 "HEAT LOSS FROM THE SKIN OF PRETERM AND FULLTERM NEWBORN INFANTS DURING THE FIRST WEEKS AFTER BIRTH."
Hammerlund K, Strömberg B, Sedin G. 1-10.

- [20] 2008 " *GIDEMS NEONTAL ENGINEERING.*"
Bruno Castellón, Ajito.
<http://www.pucp.edu.pe/grupo/gidems/1/es/patentes-ban.html>.
- [21] 2004 *TERMODINÁMICA*
Manrique Valadez, Jose Angel.
- [22] 2008 *REAL ACADEMIA ESPAÑOLA*
Española, Real Academia.
<http://www.rae.es/rae.html>.
- [23] 2006. " *DRAEGER MEDICAL SYSTEMS. WARMING THERAPY: CLOSED CARE BROCHURE* " http://www.draeger-medical.com/MT/internet/EN/us/lib/Brochures/Warming_Therapy/int_lib_broch_warm_closed.jsp.
- [24] 2003 " *INGENIERIA DE CONTROL MODERNA* "
Ogata, Katsuiko. Edited by Pearson Educación S.A. 2003.
- [25] 1993 " *FUZZY CONTROL ANDA FUZZY SYSTEMS* "
Wiley, Witold Pedrycz John. second edition vols. 1993.
- [26] 1995 " *PID CONTROLLERS: THEORY, DESIGN AND TUNNING* "
T.Hagglund., K. Astrom y. 1995.
- [27] 2004 " *MANUAL MOOLLER PLC DE CONTROL EASY820* "
Mooller.
- [28] 1996 " *INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION* "
International Electrotechnical Commission. 1996. <http://www.iec.ch>.
- [29] 1996 " *INTERNATIONAL ELECTROTECHNIQUE COMMISSION* ".
International Standard. Suiza, 1996.
- [30] 1997 " *AUTÓMATAS PROGRAMABLES* "
L., Balcells Josep y Romeral José. Alfaomega-Marcombo, 1997.
- [31] 2008 " *DESARROLLO DE UN SISTEMA CONTROLADOR DE MEZCLA DE AIRE Y OXÍGENO PARA EL PROYECTO NEONATAL* "
Chipana Quispe, Raúl Darío. 2008.

- [32] 1942 " *OPTIMUM SETTINGS FOR AUTOMATIC CONTROLS* " Nichols, Ziegler J. B. y N.B. 1942.
- [33] 2010 "YSI TEMPERATURE." YSI Temperature. Compiled by temperature@ysi.com. Dayton, Ohio.
- [34] 2003 "SINGLE SUPPLY, MICROPOWER." Burr - Brown. *Instrumentation Amplifier*. 2003.
- [35] 2001 " *SINGLE SUPPLY DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS* " Semiconductor, ON. USA, Phoenix.
- [36] 2008 "S216S02 SERIES." SHARP. USA.
- [37] 2009 " *SISTEMA ELECTRÓNICO QUE PERMITE MEDIR Y EVALUAR LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN INCUBADORAS NEONATALES* " Coello, Jorge. 2009.
- [38] 2007 "PAQUETE TECNOLÓGICO DE BURBUJA ARTIFICIAL NEONATAL." Lévano, Bruno Castillón.