



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO
DE INCUBADORA NEONATAL USANDO LA PLATAFORMA
OPEN-SOURCE ARDUINO

AUTOR: CRUZ JUMBO, FLAVIO ANDERSSON

DIRECTORA: GUAMAN NOVILLO, ANA VERONICA

SANGOLQUÍ

2016

CERTIFICADO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INCUBADORA NEONATAL USANDO LA PLATAFORMA OPEN-SOURCE ARDUINO"* realizado por el señor *FLAVIO CRUZ*, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor *FLAVIO CRUZ* para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 16 de febrero del 2016

ING. ANA VERÓNICA GUAMAN NOVILLO

DIRECTORA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **FLAVIO CRUZ**, con cédula de identidad N° 2100417886, declaro que este trabajo de titulación "**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INCUBADORA NEONATAL USANDO LA PLATAFORMA OPEN-SOURCE ARDUINO**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 16 de febrero del 2016

FLAVIO ANDERSSON CRUZ JUMBO

C.C. 2100417886

AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

AUTORIZACIÓN

Yo, **FLAVIO CRUZ**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE INCUBADORA NEONATAL USANDO LA PLATAFORMA OPEN-SOURCE ARDUINO" cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangoquí, 16 de febrero del 2016

FLAVIO ANDERSSON CRUZ JUMBO

C.C. 2100417886

DEDICATORIA

A mi madre Edith Jumbo Gómez y mi padre Guillermo Cruz Mera por darme la fuerza necesaria para cumplir todas las metas que me he puesto en el camino, quienes a pesar de la distancia siempre me han sabido brindar su apoyo incondicional.

A mi hermana por ser un pilar importante en mi vida, una segunda madre quien supo apoyarme en todo momento.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y mi hermana por brindarme su apoyo durante toda mi formación profesional y darme su apoyo incondicional a pesar de la distancia. A mi directora del proyecto de investigación Ing. Ana Guamán por ser una guía primordial durante la ejecución del proyecto y por ultimo a una persona importante en este proceso, Nicole Reyes Jurado quien ha sabido ser un gran apoyo.

ÍNDICE CONTENIDO

CARÁTULA	
CERTIFICADO	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvi
 CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Causas principales del nacimiento de neonatos prematuras	3
1.1.2. Mortalidad de los neonatos en el País.....	5
1.2. Justificación e Importancia	7
1.3. Objetivos.....	8
1.3.1. General.....	8
1.3.2. Específicos.....	8
1.4. Estado del arte	8
 CAPITULO 2	
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Incubadora Neonatal.....	11
2.2. Estudio de las Normas para la fabricación de incubadoras neonatales	12
2.2.1. Normativa para la implementación de una incubadora	14
2.2.2. UNE-EN 60601-2-19 (AENOR, Enero 2010).....	14
2.2.3. Incumplimiento de las normas.....	17
2.3. Características técnicas de los elementos electrónicos del prototipo	18
2.3.1. Tarjeta Arduino MEGA.....	18

2.3.2. Tarjeta Arduino Open Source	21
2.3.3. LCD KEYPAD SHIELD de Arduino	25
2.3.4. Arduino ETHERNET SHIELD	27
2.3.5. Sensor de temperatura LM35.....	30
2.3.6. Termistor NTC 10K encapsulado	32
2.4. Características técnicas del sistema de control del prototipo	32
2.4.1. Niquelinas	33
2.4.2. Ventiladores axiales.....	34
2.4.3. MOSFET para conmutación de potencia.....	36
2.4.4. Relé de estado solido	37
2.5. Sistema de Control PID utilizado en el diseño de la Incubadora Neonatal	38
2.5.1. Conceptos Generales	38
2.5.1.1. Sistema de control.....	38
2.5.1.2. Control proporcional, integral y derivativo (PID)	42
2.5.1.3. Acción Proporcional	42
2.5.1.4. Acción Integral.....	43
2.5.1.5. Acción Derivativa	44
2.5.1.6. Sintonización de Controladores PID.....	47
2.5.1.7. Método de la curva de reacción Ziegler y Nichols	47

CAPITULO 3

3. Diseño del Hardware del prototipo de Incubadora Neonatal.....	50
3.1. Descripción.....	50
3.2. Requerimientos	51
3.3. Diagrama de bloques de la estructura del prototipo de incubadora.....	52
3.4. Diseño del sistema mecánico y estructura de la incubadora.....	53
3.4.1. Diseño de la estructura física de la Incubadora Neonatal.....	55
3.4.1.1. Diseño de la Cubierta de la Incubadora Neonatal.....	57
3.4.2. Diseño del sistema de calefacción para el control de temperatura.	59
3.4.3. Análisis de la posición de los sensores de temperatura y corporal.....	60

CAPÍTULO 4

4.	Diseño del software del Prototipo de Incubadora Neonatal	63
4.1.	Descripción.....	63
4.2.	Requerimientos.....	64
4.3.	Diagrama en bloques del software de control del prototipo.....	64
4.4.	Características del sistema de control de temperatura de la incubadora.	65
4.4.1.	Dimensionamiento de los elementos principales del prototipo	67
4.4.1.1.	Fuente de Alimentación.....	67
4.4.1.2.	Tarjetas de control.....	69
4.4.1.3.	Ventilador Helicoidal.....	70
4.4.1.4.	Calculo de la resistencia de la niquelina a temperatura ambiente	71
4.4.1.5.	Configuración de sensores de temperatura de la incubadora.....	72
	Temperatura ambiental.....	72
4.4.1.6.	Temperatura del sistema de calefacción	73
4.4.1.7.	Temperatura corporal del neonato	74
4.5.	Diseño del Sistema de Control del prototipo.....	76
4.5.1.	Modelamiento de la planta.....	78
4.5.2.	Control PID de temperatura para los modos de operación.....	82
4.5.2.1.	Determinar los valores de K_p , K_i y K_d	83
4.5.4.	Diseño de tarjetas de control de la Incubadora Neonatal NPI.....	93
4.5.5.	Etapas de Potencia.....	97
4.6.	Panel Operador – Equipo.....	98
4.6.1.1.	Interfaz HMI para visualización remota	99
	CAPÍTULO 5	100
5.	Resultados y Validación del Prototipo	100
5.1.	Análisis de funcionamiento del Prototipo	100
5.2.	Análisis de la respuesta del controlador PID.....	104
5.3.	Análisis del ruido producido por el equipo en funcionamiento.....	108
5.4.	Análisis de las alarmas y protecciones de la incubadora neonatal	109

5.5. Protección de la Incubadora Neonatal NPI.....	109
5.6. Análisis de las normativas implementadas.	111
5.7. Análisis de costo de elaboración de la Incubadora neonatal	113

CAPITULO 6

6. Conclusiones y recomendaciones	120
7. Referencias bibliográficas	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características físicas del prematuro.....	4
Tabla 2 Causas Principales de mortalidad infantil Ecuador 2009.....	6
Tabla 3 Factores de riesgo que induce a la mortalidad neonatal.....	6
Tabla 4 Características de una Incubadora Neonatal	12
Tabla 5 Principales normas internacionales relacionadas con incubadoras.....	12
Tabla 6 Requisitos esenciales de funcionamiento de la incubadora	16
Tabla 7 Características Técnicas Generales del Arduino Mega.....	18
Tabla 8 Uso del SHIELD LCD mediante código.....	26
Tabla 9 Características generales del SHIELD LCD KEYPAD	26
Tabla 10 Requerimientos de trabajo del Arduino Ethernet Shield	27
Tabla 11 Características de las Resistencias Eléctricas tubulares.....	33
Tabla 12 Características Generales de los ventiladores helicoidales	35
Tabla 13 Parámetros de Ziegler y Nichols.....	49
Tabla 14 Información técnica para la construcción del equipo neonatal	55
Tabla 15 Características técnicas de la fuente de alimentación	68
Tabla 16 Valores obtenidos del sensor.....	75
Tabla 17 Valores de Temperatura vs Tiempo	79
Tabla 18 Valores calculados por el método de ZN	84
Tabla 19 Datos obtenidos de las Funciones de transferencias	87
Tabla 20 Valores de temperatura obtenidos en un rango de 30°C a 38°C.....	100
Tabla 21 Diferencia de temperatura según la normativa UNE-EN 60601-2-19.....	102
Tabla 22 Error Absoluto y relativo del Sistema frente al sensor LM35	102
Tabla 23 Error Absoluto y relativo del Sistema frente al sensor NTC	103
Tabla 24 Datos obtenidos en la prueba de funcionamiento del equipo.....	106
Tabla 25 Medición del ruido reducido por el ventilador	108
Tabla 26 Normativas implementadas en la incubadora neonatal.....	112
Tabla 27 Costos de fabricación de la incubadora neonatal NPI.....	113
Tabla 28 Descripción de las partes constitutivas del panel de control.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura del sistema de la Incubadora	9
Figura 2 Diagrama básico de la plataforma Arduino	22
Figura 3 Partes constitutivas del SHIEL LCD ARDUINO	25
Figura 4 a) Ethernet shield frontal b) Ethernet shield trasera	28
Figura 5 Diagrama en bloques de la etapa de potencia de la Incubadora	33
Figura 6 Resistencia Industrial tipo tubular	34
Figura 7 Ventilador helicoidal	35
Figura 8 Diagrama en bloques del uso del MOSFET en la incubadora.....	36
Figura 9 Conexión MOSFET con un micro	37
Figura 10 Uso del Relé de estado sólido en el prototipo.....	37
Figura 11 Relé de estado sólido Fuente: (BC, 2010)	38
Figura 12 Esquema general de un sistema de control	39
Figura 13 Esquema de un sistema de control con sus partes constitutivas	40
Figura 14 Señal de salida ante la presencia de una señal tipo escalón.....	41
Figura 15 Control Proporcional	42
Figura 16 Señal de la acción proporcional	43
Figura 17 Sistema de control Proporcional e Integral.....	43
Figura 18 Señal discreta del error para la acción integral	44
Figura 19 Sistema de control Acción derivativa	45
Figura 20 Señal de error Acción derivativa	45
Figura 21 Sistema de control PID para un controlador digital.....	46
Figura 22 Análisis grafico de la curva de respuesta del proceso	48
Figura 23 Diagrama de bloques de la estructura de la incubadora neonatal.....	52
Figura 24 Diagrama en bloques del diseño de la incubadora neonatal NPI.....	53
Figura 25 Diagrama de la disposición de elementos en la cubierta.	54
Figura 26 Diagrama en bloques del proceso de calefacción de la incubadora.....	54
Figura 27 Estructura del Equipo Medico	56
Figura 28 Base de la Incubadora neonatal	57
Figura 29 Cubierta del neonato	57

Figura 30 (a) Orificios compuerta (b) Orificios a los costados.....	58
Figura 31 a) Vista general b) Vista Frontal c) Posterior d) Lateral	58
Figura 32 a) Orificios de ventilación b) vista niquelina y ventilador	60
Figura 33 Colocación de los sensores en la Incubadora Neonatal	61
Figura 34 a) Sensor sin capsula b) sensor con capsula	61
Figura 35 Estructura de la incubadora Neonatal terminada	62
Figura 36 Diagrama de bloques del software de control del prototipo	65
Figura 37 Estados de control de la incubadora neonatal NPI	66
Figura 38 Implementación de los elementos del sistema de control.....	67
Figura 39 Voltajes de alimentación y los elementos alimentados.	68
Figura 40 Relación entre el Arduino mega y el SHIELD LCD	69
Figura 41 Proceso de envío de la lectura del sensor corporal por la red.....	70
Figura 42 Activación del ventilador de la incubadora	70
Figura 43 Ventilador en funcionamiento del prototipo.....	71
Figura 44 Configuración del sensor de Temperatura Ambiental	73
Figura 45 Configuración del sensor del conducto de Calefacción.....	74
Figura 46 a) Termistor NTC 10K b) Configuración sensor corporal.....	74
Figura 47 Curva ante el aumento de temperatura Termistor NTC.....	75
Figura 48 Calculadora para los coeficientes de la ecuación	76
Figura 49 Sistema de control en Modo Directo	77
Figura 50 Sistema de control en Modo Automático.	77
Figura 51 Sistema de control en Modo Servo Controlado.	78
Figura 52 proceso para la obtención de los datos	78
Figura 53 Obtención de la señal exponencial	80
Figura 54 Función de transferencia de la Planta	81
Figura 55 Sistema de control PID de la Incubadora Neonatal NPI.....	82
Figura 56 Recta Tangente al punto de inflexión.	83
Figura 57 Diagrama en bloques del sistema con un control PID implementado	85
Figura 58 Curva de respuesta en lazo cerrado de la planta.	86
Figura 59 Controlador Implementado en la Tarjeta Arduino Mega	88
Figura 60 Diagrama de Flujo principal del prototipo.....	89
Figura 61 Diagrama de flujo en Modo Directo	90

Figura 62 Diagrama de flujo en Modo Servo Controlado.....	91
Figura 63 Diagrama de flujo del sistema de control en Modo Automático.....	92
Figura 64 Diagrama de Flujo del sistema de control en Modo Alarma.....	93
Figura 65 Disposición de los elementos en las tarjetas del prototipo	94
Figura 66 a) Diagrama CAD Principal b) Diagrama CAD Secundario.....	96
Figura 67 Diseño del control de los Displays en ISIS	97
Figura 68 Placa de sensores de temperatura en ISIS.....	97
Figura 69 Disposición de los botones de control en ISIS	98
Figura 70 Disposición del panel de control de la Incubadora.....	98
Figura 71 Envío del código HTML para monitoreo remoto	99
Figura 72 Interfase HMI via una IP estática	99
Figura 73 Lectura del sensor LM35	104
Figura 74 Lectura del sensor NTC10K.....	105
Figura 75 Lectura de los sensores durante una prueba de funcionamiento.....	107
Figura 76 Diagrama de bloques del proceso de activación de la alarma.	109
Figura 77 Interruptor térmico.....	110
Figura 78 Proceso de protección del prototipo	110
Figura 79 Puesta a tierra de la Incubadora Neonatal.....	111
Figura 80 Manipulación del prototipo con y sin puesta a tierra.....	111
Figura 81 Panel de Control de la Incubadora Neonatal	116
Figura 82 Modo Directo de la Incubadora Neonatal NPI	117
Figura 83 Ingreso al modo servo controlado de la incubadora neonatal.....	117
Figura 84 Inicio del proceso de calefacción en el modo servo controlado	118
Figura 85 Modo automático de la incubadora neonatal	118
Figura 86 Inicio del proceso de calefacción en el modo automático	119
Figura 87 Modo Alarma de la Incubadora Neonatal.....	119

RESUMEN

En la actualidad, Ecuador no realiza el desarrollo y construcción de Incubadoras Neonatales (CET, 2011) además de que las importaciones de equipos médicos está sobrevalorado en el país por las salvaguardas, por lo que es importante desarrollar estos equipos con las mismas características de funcionamiento y calidad, tomando en cuenta la normativa UNE-EN 60601-2-19 que se basa en la construcción y validación de funcionamiento Incubadoras Neonatales, la cual es el objetivo de este proyecto. La importancia del proyecto radica, en el desarrollo de una incubadora neonatal capaz de albergar un recién nacido. El proyecto abarca la realización de la parte estructural y del sistema de control de la incubadora neonatal, se propone utilizar dos tarjetas Arduinos, la primera para recibir y enviar señales que controlarán la temperatura que rodeará al neonato y una segunda tarjeta que enviará la temperatura corporal del neonato por la conexión de red hacia los computadores o dispositivos que estén conectados al hospital, con el objetivo de tener monitoreado al neonato en cada momento. Además, se instalaron alarmas para indicar el mal funcionamiento del mismo. Por último se realizaron pruebas de funcionamiento del equipo que demuestra que puede operar por varias horas, manteniendo una temperatura estable con un porcentaje de error aproximado del 1%.

PALABRAS CLAVE:

INCUBADORA NEONATAL

SISTEMA DE CONTROL DE LA INCUBADORA

TARJETAS ARDUINOS

CUBIERTA.

ABSTRACT

Nowadays, Ecuador does not develop or build any Neonatal Incubators (CET, 2011) since the imports of most medical equipments are overvalued, thanks to the tax and tariffs imposed by the government. In this case, it is important to develop these equipments with the same operation and quality characteristics, taking into consideration the norm UNE-EN 60601-2-19 which works based on the construction and validation of Neonatal Incubators' operation, which is the goal of our project. The project's importance is based on the development of a Neonatal Incubator able to accommodate a newborn. The project covers the development of the structural and control system parts of the product. It is also suggested to use two Arduinos cards. The first one will serve to receive and send signals that will control the temperature that surrounds the newborn and the second one will send the newborn's corporal temperature through the network connection to the computers or devices that could be connected to the hospital. The goal is to keep the newborn always monitored. Besides, alarms were installed to show the malfunction of the equipment. Finally, operation and function tests were performed to show that the equipment can operate for many hours, keeping a stable and constant temperature with an error percentage of approximately, 1%.

KEYWORDS:

INCUBATOR

CONTROL SYSTEM OF THE INCUBATOR

ARDUINO CARD

CORPORAL TEMPERATURE.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los recién nacidos son considerados prematuros cuando no ha completado las 38 semanas suficientes para desarrollarse físicamente dentro del interior de la madre, además si la madre comienza labor de parto a las 37 semanas de embarazo el niño se considera prematuro (OMS, 2013). El problema con un bebe prematuro es que su organismo no está preparado para enfrentarse al mundo exterior, por lo que los neonatos pierden con mayor rapidez el calor corporal. De hecho, durante el siglo XIX (CET, 2011) los bebes fallecían porque la temperatura corporal de su cuerpo bajaba con rapidez al estar expuesto a ambientes fríos.

La edad gestacional, el peso, la edad postnatal, la vestimenta eran los factores que intervenían en la perdida de calor del neonato y causa principal para su fallecimiento (Ventura-Juncá, 2015). Los avances tecnológicos que surgieron a partir del año 1900 ayudaron a solventar estos inconvenientes y desarrollándose la incubadora neonatal.

El 1878 el ginecólogo de origen parisino Stéphane Tarnier modificó una cámara con un calentador basándose en una incubadora para la cría de pollos que observo en una feria del zoológico. Tarnier tomo la idea de la incubadora de pollos y contrató a una persona para que le construyera un aparato que pudiera hacer un servicio similar a los neonatos.

Tarnier conocía que la regulación de temperatura era un aspecto crucial para que los niños no murieran, el demostró con un estudio que mientras el 66% de los nacidos con poco peso morían a las pocas semanas de nacer, solo corría esa misma suerte el 38% de los que pasaban un tiempo en la incubadora. Después del invento de la incubadora neonatal la tasa de mortalidad cayó significativamente un 75% (CET, 2011).

En la actualidad existen varios tipos de incubadoras como la de transporte (Expo, 2015), de terapia intensiva (Cassisi, 2005-2015), estacionaria (LIFETEC, 2015) y cuidados intensivos (Prat, 2015). La diferencia entre estas incubadoras es el uso que brinda al neonato en el momento de su nacimiento. Además poseen varias características técnicas como lo son; servo control de temperatura, pantalla con gráficas, cortina de aire, etc. El costo del equipo depende de las características técnicas y área donde se las va a utilizar. Por ejemplo, el objetivo de las incubadoras de transporte es mantener la temperatura adecuada del bebe hacia el área de cuidados intensivos.

La empresa argentina Medix ICSA (D&E, 2015), es la principal referencia regional en el desarrollo de equipamiento para terapia neonatal. Incursiono con una incubadora neonatal en el 2004 llamada PC-308, donde se enfocó en lograr conjugar los requerimientos de funcionalidad con una imagen amigable, de gran contenido simbólico (D&E, 2015).

Otro ejemplo es la mochila-incubadora para neonatos en tránsito, diseñada en el 2010 por estudiantes de la Universidad de Colorado, su uso no es novedoso puesto que ya existen otras incubadoras de transporte, pero es menos costosa y más portátil. El sistema integra calefacción eléctrica, un controlador de oxígeno, alarmas de monitoreo de presión y temperatura y un dispositivo de circulación de aire. También lleva unas suspensiones que absorbe el impacto para proteger a los bebés durante el viaje (Civantos, 2010).

La incubadora neonatal que se presenta en este trabajo, es de tipo estacionaria y presenta las siguientes características:

- Un sistema de control a base de dos tarjetas Arduinos.
- Un sistema de calefacción para circulación del aire.
- Un acceso principal y varios secundarios para manipulación del neonato e ingreso del mismo
- 3 sensores de temperatura, cabe recalcar que las incubadoras neonatales por lo general tienen de uno a dos sensores dependiendo del costo del equipo.
- Una interfaz para visualizar la temperatura del neonato y del ambiente

- Botones de selección para ingresar a los modos de operación
- Indicadores de alarma tanto visual como auditivo
- Un sistema de protección por exceso de temperatura mecánico
- Una conexión de red para monitorear la temperatura del bebe a través de internet.

Esta incubadora es única en el país, se desarrolló a través de un dispositivo Arduino para controlar todo el sistema y permite realizar la monitorización del paciente de forma remota.

1.1.1. Causas principales del nacimiento de neonatos prematuras

El nacimiento prematuro es un problema de salud serio, los recién nacidos prematuros corren un riesgo mayor de tener complicaciones de salud, como problemas respiratorios, e incluso de morir. Es indispensable una atención especial en una unidad de cuidados intensivos neonatal, con personal médico y equipos especializados capaces de tratar los diferentes problemas a los que están expuestas.

Se considera prematura a un bebé nacido antes de 37 semanas completas de gestación. Al nacer un bebe se clasifica de la siguiente manera:

- Prematuro : menos de 37 semanas de gestación
- A termino : 37 a 42 de gestación
- Postérmino o posmaduro : nacido después de 42 semanas de gestación (González Zhindón & Granda Juca, 2010).

Si la madre entra en trabajo de parto antes de las 37 semanas se denomina contracciones prematuras. Los bebes prematuros tardíos que nacen entre 35 y 37 semanas de gestación no lucen prematuros. Posiblemente no se los ingresa en una unidad de cuidados intensivos, pero aun así están en riesgo de más problemas que los bebes a término. En la Tabla 1 se listan las principales características físicas de los bebes prematuros.

Tabla 1
Características físicas del prematuro

Características Físicas de un neonato	
Peso	Menos de 2.5 kilogramos
Talla	Menos d 47 centímetros
Perímetro Torácico	Menos de 29 centímetros
Perímetro Craneal	Menos de 34 centímetros
Actividad postural extremidades	Hipotonía y extremidades en extensión
Cabeza	Grande y Craneotabes (huesos craneales blandos)
Ojos prominentes	El aparato palpebral no se desarrolló hasta las 25-26 semanas, por lo que es un signo a valorar para saber si el feto será viable o no.
Tórax	Estrecho. Mamilas o nódulos mamarios poco desarrollados.
Abdomen	Prominente
Piel	Delgada, Resalte de relieves óseos, color rojizo intenso, ictericia precoz y persistente.
Genitales	Testículos no descendidos. Escroto con pocas arrugas. Labios mayores poco desarrollados.
Extremidades	Cortas y delgadas (poco desarrollo muscular). Unas blandas y cortas. Pliegue único transversal en plantas de los pies.

Fuente: (González Zhindón & Granda Juca, 2010)

Los problemas de salud en la madre como diabetes, cardiopatía y nefropatía pueden contribuir a las contracciones prematuras. Con frecuencia la causa de las contracciones prematuras se desconoce. Los embarazos múltiples, como es el caso con gemelos o trillizos, representan el 15% de todos los nacimientos prematuros (González Zhindón & Granda Juca, 2010).

Diferentes problemas relacionados con el embarazo incrementan el riesgo de contracciones prematuras o el parto prematuro:

- Un cuello uterino debilitado que comienza a abrirse (dilatarse) temprano, también llamado insuficiencia cervicouterina.
- Anomalías congénitas del útero.

- Antecedentes de parto prematuro.
- Infección (una infección urinaria o de la membrana amniótica).
- Mala nutrición poco antes o durante el embarazo.
- Preeclampsia: hipertensión arterial y presencia de proteína en la orina después de la semana 20 del embarazo.
- Ruptura prematura de membranas (placenta previa) (González Zhindón & Granda Juca, 2010).

Otros factores que incrementan el riesgo de contracciones prematuras y un parto prematuro son:

- Edad de la madre (madres menores de 16 y mayores de 35)
- Raza negra
- Falta de cuidados prenatales
- Nivel socioeconómico bajo
- Consumo de tabaco, cocaína o anfetaminas (González Zhindón & Granda Juca, 2010).

1.1.2. Mortalidad de los neonatos en el País

Según la Organización Mundial de Salud (OMS), define a la mortalidad neonatal como la muerte producida desde el momento del parto hasta los primeros 28 días de vida (González Zhindón & Granda Juca, 2010). Las principales causas de que un neonato muera prematuramente son los trastornos respiratorios, la asfixia perinatal, las malformaciones congénitas y las infecciones. El peso bajo al nacer, que es un factor predisponente se estima que llega al 6,8%. El alto porcentaje de cesáreas constituyen otro factor de riesgo para los recién nacidos, aunque en situaciones indicadas sea un procedimiento importante para salvar la vida de la madre y del/a recién nacido/a (González Zhindón & Granda Juca, 2010).

Las causas de mortalidad infantil en el Ecuador durante el 2009 según la lista Internacional Detallada-CIE-10 (acrónimo de la clasificación internacional de enfermedades según la ICD International Statistical Classification) se detallan en la Tabla 2. Y tal como se puede observar, la mayor causa de mortalidad de los neonatos

son los trastornos del bebé relacionados con una corta duración de la gestación y con bajo peso al nacer.

Tabla 2
Causas Principales de mortalidad infantil Ecuador 2009

Causa	Porcentaje
Trastornos relacionados con duración corta de la gestación y con bajo peso al nacer.	17.4%
Malformaciones Congénitas	1.4%
Hipoxia Intrauterina	2.3%
Síndromes de Aspiración Neonatal	2.3%
Dificultad Respiratoria	2.5%
Sepsis	6.6%
Neumonía Congénita	2.8%
Trastornos Cardiovasculares originados en el periodo perinatal	1.1%
Asfixia	1.6 %
Hidrocefalo congénito	1,2%

Fuente: (González Zhindón & Granda Juca, 2010)

Además, Los principales factores de riesgo que puedan provocar fallecimiento de un neonato durante sus primeros días de vida son los especificados en la Tabla 3. Existen otros factores que afectan la supervivencia de los recién nacidos son las infecciones maternas, como las de transmisión sexual (VIH/sida, la sífilis), infección de las vías urinarias y la malaria. Un bajo nivel educativo de la madre, un régimen alimentario deficiente, recursos limitados y un acceso inadecuado a los servicios de salud, una atención deficiente durante el trabajo de parto, el parto y el posparto, así como pocas posibilidades para tomar sus propias decisiones, son también factores importantes (González Zhindón & Granda Juca, 2010).

Tabla 3
Factores de riesgo que induce a la mortalidad neonatal

Factor de Riesgo	Condición
Desnutrición materna, la edad de la madre	Menor de 18 años o mayor de 35 años
Un intervalo breve entre nacimientos	Menos de tres años entre los embarazos

Continúa 

Hemorragia durante el tercer trimestre y complicaciones de parto	Trabajo de parto prolongado u obstruido
--	---

Fuente: (González Zhindón & Granda Juca, 2010)

1.2. Justificación e Importancia

De acuerdo a lo expuesto anteriormente es claro que el cuidado de bebés prematuros es importante para mantener con vida a los recién nacidos durante las primeras semanas, las cuales son las más riesgosas porque pueden sufrir varias complicaciones y estas pueden llevar a la muerte del bebé o afectarles paulatinamente. Cabe recalcar que todo el equipo utilizado para mantener con vida a los bebés prematuros es de fabricación extranjera ya que no existe una entidad que se dedique a la producción nacional de equipos médicos. De hecho el presupuesto asignado al equipamiento médico de nuestro país es valorado en \$1'000.000 de dólares aproximadamente para cada centro de salud que se inaugura, tal como se aprecia en varias publicaciones del ministerio de salud (EXPLORED, 2010).

El presente proyecto permite implementar un prototipo de incubadora neonatal que servirá como sustento teórico y práctico para futuros desarrollos de equipos médicos que trabajen con neonatos. La importancia de este prototipo se basa en la incorporación de la tarjeta OPEN SOURCE Arduino, para realizar el sistema de control de la incubadora. Esta tarjeta permite trabajar con varios sistemas operativos entre ellos, Windows, OSX y Linux, además el entorno de programación es fácil y flexible (ELECTRÓNICA, TODO, 2015).

La importancia de la tarjeta Arduino en el desarrollo de equipo médico, es la flexibilidad de programación que tiene para desarrollar un sistema de control que solventa todos los requerimientos de un recién nacido como el control de temperatura de su cuerpo y monitoreo durante los primeros días de vida en la que se encuentra en peligro, etc. El uso de este software permite reducir gastos en la implementación del prototipo de incubadora, sin embargo el abaratar costos no influye en la capacidad de trabajo del dispositivo para obtener un equipo terminado y confiable.

La empresa IX Biotron del Ecuador siendo pionera en el mercado médico, investigación y actualización de equipos biomédicos, ha presentado la oportunidad de

trabajar de la mano, desarrollando la estructura física y mecánica de la Incubadora neonatal en la que será implementado el sistema control, sirviendo así como investigación para futuros desarrollos de equipos médicos.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Diseñar e implementar un prototipo de incubadora neonatal usando la plataforma OPEN-SOURCE ARDUINO para la empresa IX Biotron del Ecuador LTDA.

1.3.2. Específicos

- Diseñar la estructura física de la incubadora neonatal.
- Diseñar el sistema de calefacción para un óptimo funcionamiento del sistema de control de temperatura.
- Realizar un control de temperatura que cumplan las normativas internacionales especificadas para incubadoras neonatales.
- Diseñar la interfaz de comunicación entre el PC y la tarjeta Arduino para la visualización de los parámetros del neonato.
- Diseñar la HMI de la Incubadora.
- Diseñar el panel de monitoreo y control de la incubadora neonatal.
- Realizar las pruebas de ensayo y funcionamiento.

1.4. Estado del arte

Para el estudio del arte se realizó una recopilación de artículos relacionados con la construcción y funcionamiento de incubadoras neonatales, esta página que alberga estos artículos, es reconocida por sus publicaciones a nivel mundial llamada así Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, 2016).

Lina Zhang y Zhou Runjing de la universidad de Mongolia Hohhot realizaron el diseño de una incubadora para un niño prematuro basado en LabView. Dando como resultado final del proyecto una rapidez de precalentamiento, la visibilidad de la

temperatura, de fácil operación y de facilidad de mantenimiento. Crearon varios dispositivos de alarma automáticos conectados al funcionamiento del ventilador cuando deja de girar o un sensor roto, además redujeron el tiempo de estabilidad y el control del equipo lo realizaban a través de un computador. El diseño del prototipo se basó en la creación del hardware es decir los circuitos de adquisición de señales y control de la temperatura y un software creado en LabVIEW para el control total del experimento como se aprecia en la Figura 1 (Zhang & Runjing, IEEE Xplore, 2006).

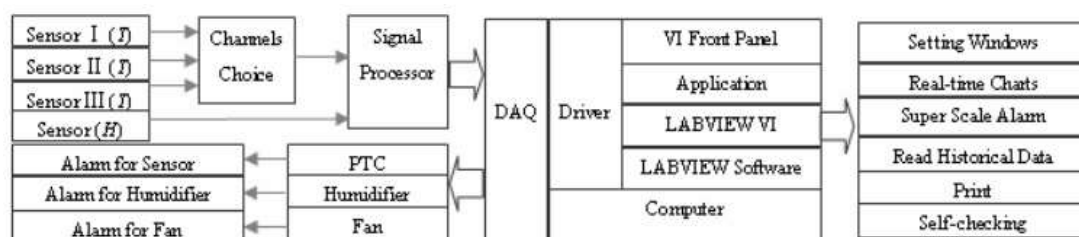


Figura 1 Estructura del sistema de la Incubadora

Fuente: (Zhang & Runjing, researchgate.net., 2007)

Ruilan Wang de la universidad Weifang de China realizó el diseño de un sistema de control de temperatura y humedad para incubadoras basándose en un microordenador de un solo chip. Donde su objetivo fue realizar un control de temperatura y humedad utilizando un sensor DSI8820 (sensor de temperatura de autobuses) para mejorar la precisión de la medida de temperatura y un sensor HM1500 para la detección de la humedad dentro de la incubadora (Wang, 2011).

K. Bauer y LA. Mendes de la universidad Pontificia Católica de Paraná en Curitiba Brasil realizaron un WebLab basado en el control de una incubadora para un recién nacido. Donde se realizó laboratorios de operación remota permitiendo el control y la supervisión del recién nacido a distancia, en el que el propósito de este proyecto se basó en la variación de los parámetros de control del PID realizado en LabVIEW, para obtener el mejor confort térmico en la incubadora. La operación del laboratorio estuvo dentro de la norma de seguridad asociada y se asoció la red del campus para manejar los equipos remotamente. Además incluyó en este software la evaluación

correspondiente para el estudiante, evaluando las habilidades de este mediante un índice de rendimiento mientras está operando el equipo (Bauer & Mendes , 2015).

Una vez realizado la recopilación de información correspondiente a la construcción de incubadoras neonatales, se identificó los requerimientos básicos de funcionamiento y construcción como el manejo de la temperatura para el confort térmico dentro de la incubadora y la monitorización de los parámetros del neonato, causas principales que pueden afectar directamente a la vida del bebe.

CAPITULO 2

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo se encuentra dividido en dos partes: la primera parte explica las características principales de las incubadoras neonatales; así como también el uso de la norma que tiene relación con la seguridad y fabricación de las mismas, en la segunda parte se evalúan los factores que intervienen en el proceso de implementación del control de temperatura para el equipo.

2.1. Incubadora Neonatal

Este equipo fue diseñado para la unidad de cuidados intensivos neonatales, donde se espera que los bebés prematuros tendrán varias complicaciones al nacer, entre ellas la rápida pérdida de temperatura corporal, por lo que la incubadora se encargará de calentar al bebé hasta una temperatura recomendable para su posterior desarrollo físico (Cassisi, 2005-2015).

La incubadora lo protegerá del ambiente que lo rodea a través de una cubierta transparente para poder observarlo como va evolucionando. Todas las incubadoras tienen un panel frontal que indica la temperatura tanto del ambiente que rodea al neonato como la temperatura corporal del mismo. La norma que usan la mayoría de compañías para construir incubadoras neonatales, es la UNE-EN 60601-219, que se basa en los requisitos particulares de seguridad y funcionamiento esencial que deben cumplir estos equipos de cuidados intensivos. Las incubadoras por ser equipos de cuidados intensivos y tienen una relación directa con neonatos, deben tener como protección principal una conexión de puesta a tierra. En cuanto a las características técnicas y físicas se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4
Características de una Incubadora Neonatal

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Dimensiones físicas	90 cm de largo, 40 cm de anchura 45 cm de altura (Constanza, 2012)
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.	
Eficiencia	99%
Voltaje de alimentación	De 108 a 132 V en AC
Potencia máxima de entrada	120VA o 120 W
Potencia de disipación	30 W
Corriente en plano posterior	3.5 A 12 V
Fuente externa	0.5 A 12 V

2.2. Estudio de las Normas para la fabricación de incubadoras neonatales

Existen varias normas para la fabricación de equipos médicos, y son usadas principalmente para proteger la vida del paciente. El uso de estas normas permiten tanto al operador como al paciente, estar seguro al momento de utilizar cualquier equipo. La Tabla 5 muestra varias normas y el año en que fueron expedidas, pero en general este estudio se enfocará en el uso de la normativa UNE-EN 60601-2-19 que abarca la mayoría de las normas expuestas en la tabla mencionada.

En Ecuador no existe un comité que implemente una normativa para la construcción de un equipo médico. Esto se debe a que no se construye ninguna clase de aparato médico, por lo tanto se recurre a las normativas internacionales que ya tienen muchos años en vigencia y están validadas por organizaciones internacionales como las expuestas en la Tabla 5.

Tabla 5
Principales normas internacionales relacionadas con incubadoras

NORMA	Expedida por	Año
NOM-066-SSA1-1993	Secretaria de Salud México	1995
Especificaciones sanitarias de las incubadoras		

Continua 

IEC 60601-1 (1988-12). Medical electrical equipment, part: general requirements for safety	IEC	1988
IEC 60601-1-am1 (1991-11). 1991. Medical electrical equipment, part 1: general requirements for safety. Amendment 1.	IEC	1991
IEC 60601-1-am2 (1995-03). 1995. Medical electrical equipment, part 1: general requirements for safety. Amendment 2.	IEC	1995
IEC 60601-1-2 (2001-09). 2001. Medical electrical equipment, part 1: general requirements for safety. Section 2. Collateral standard: electromagnetic compatibility, requirements and tests.	IEC	2001
IEC 60601-2-19 Ed. 1.0 b: 1990, Medical electrical equipment. Part 2: Particular requirements for the safety of baby incubators	IEC	1990
IEC 60601-2-20 Ed. 1.0 b: 1990, Medical electrical equipment. Part 2: Particular requirements for the safety of transport incubators	IEC	1990
ANSI/AAMI II36. 1984 (REVISED 1998). Infant incubators	ANSI/AAMI	1998
ANSI/AAMI II36-1997. 1991 (revised 1998). New standard offers guidelines for infant incubator safety	ANSI/AAMI	1997

Continua 

ANSI/AAMI ES1-1993. 1985 (revised 1993). Safe current limits for electro medical apparatus	ANSI/AAMI	1993
ANSI/AAMI II51-1996. 1996. Transport infant incubators.	ANSI/AAMI	1996
BS 5724: Section 2.20. 1982 Specification for nursing incubators	BS	1982
BS 5724: Section 2.21. 1983. Specification for transport incubators	BS	1983

Fuente: (IEC, Copyright ©, 2015)

2.2.1. Normativa para la implementación de una incubadora

El objetivo de una norma se basa en cumplir los requisitos mínimos de seguridad y funcionamiento, por lo tanto se va a implementar una normativa con las siguientes características: controlar la temperatura dentro del cubículo, que se pueda observar al neonato desde el exterior, de fácil acceso al interior y que no tenga contacto él bebe con el ambiente exterior.

La normativa que implementaremos en el desarrollo del prototipo fue preparada por el Sub comité SC 62D, Equipos electro médicos y fue aprobado por CENELEC como UNE-EN 60601-2-19 y se basa en los requisitos mínimos de seguridad que tiene una incubadora para poder operar en un Hospital (CENELEC, 2015). Esta norma fue traducida en tres versiones oficiales (Alemán, francés e Inglés).

2.2.2. UNE-EN 60601-2-19 (AENOR, Enero 2010)

Para la implementación del prototipo se usó varios segmentos de esta norma que son los siguientes:

- **201.3.201 Incubadora regulada por aire:** Temperatura regulada automáticamente a través de la lectura de un sensor del aire comparada con la temperatura de mando seleccionada por el operador.

- **201.3.202 Temperatura media de la incubadora:** Valor medio de las lecturas de temperatura de la incubadora tomadas en intervalos una vez alcanzada la condición de temperatura estabilizada
- **201201.3.204 Incubadora regulada por él bebe:** Temperatura regulada automáticamente a través de la lectura de un sensor de temperatura cutánea de acuerdo con la temperatura de mando seleccionada por el operador.
- **201.3.205 Habitáculo del bebe:** Área con ambiente controlador, destinado para albergar al bebe, dotado de una o varias secciones transparentes que permiten observar al bebe.
- **201.3.206 Temperatura de mando:** Temperatura seleccionada en el panel por el operador.
- **201.3.207 Temperatura de la incubadora:** Temperatura del aire en un punto situado a 10cm por encima del centro de la superficie en el área del bebe.
- **201.3.208 Bebe:** Paciente de hasta 3 meses de edad y un peso inferior a 10kg.
- **201.3.209 Incubadora:** Equipo médico que dispone de una cubierta para él bebe con medios para regular el ambiente que lo rodea, básicamente por calentamiento de aire.
- **201.3.210 Temperatura cutánea:** Temperatura de la piel del bebe en el punto donde se coloca el sensor de temperatura cutánea.
- **201.3.211 Sensor temperatura cutánea:** Dispositivo sensible destinado a medir la temperatura cutánea del bebe.
- **201.3.212 Condición de temperatura estabilizada:** Condición alcanzada cuando la temperatura no varía en más de 1°C en un periodo de una Hora.
- **201.4.3.101 Funcionamiento esencial de las incubadoras:** Los requisitos de funcionamiento esencial que se dan en los apartados listados en la Tabla 6.

- **201.5.3 Temperatura ambiente, humedad, presión atmosférica:** Explicación de condiciones de utilización normal y rangos de temperatura que debe tener una Incubadora neonatal.
- **201.9.6.2.102 Nivel sonoro de las alarmas audibles:** El nivel sonoro que debe tener el área donde se encuentra la incubadora neonatal sin que afecte directamente al bebe.
- **201.11 Protección contra temperaturas excesivas y otros peligros:** muestra los peligros que puede ocurrir y afecten directamente al paciente y al equipo (Ver anexo 1).

La incubadora neonatal será regulada por aire y por la termorregulación del bebe como lo dicta la norma UNE-EN 60601-2-19, es decir, la temperatura de la incubadora se regulara automáticamente, tomando como referencia la lectura del sensor de ambiente ubicado dentro del habitáculo y también tendrá la opción de regular la temperatura tomando como referencia la lectura del sensor cutáneo ubicado en la piel del bebe. Siguiendo la sección **201.3.205** de la Norma UNE-EN 60601-2-19, La cubierta de la incubadora del neonato será de material transparente, permitiendo al operador observar al bebe, además tendrá orificios de acceso alrededor del equipo para poder manipular al bebe sin sacarlo de la incubadora. Es esencial que para el funcionamiento de la incubadora se cumpla lo listado en la Tabla 6.

Tabla 6
Requisitos esenciales de funcionamiento de la incubadora

Requisito	Apartado	Explicación de sección
Requisito 1 de FUNCIONAMIENTO ESENCIAL	201.12.1.104 o generación de una alarma visual y audible	Cuando la incubadora entra en modo de operación, la temperatura de mando no debe variar en más de 0.7°C en la condición de temperatura estabilizada caso contrario se encenderá una alarma audible.
Requisito 2 de FUNCIONAMIENTO ESENCIAL	201.12.1.105 o generación de una alarma visual y audible	El intervalo de operación de la incubadora será de 20°C a 40°C y con una exactitud de 0.8°C en la lectura del sensor de temperatura.

Continúa 

Fuente: (AENOR, Enero 2010)

La temperatura de mando automática sin acceder al menú debe estar comprendida entre los $36^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, y siempre debe exceder a la temperatura ambiente en 3°C como mínimo. Según la sección 201.7.9.2.2 avisos y consignas de seguridad las incubadoras y cualquier equipo médico debe tener una puesta tierra, esto es esencial para garantizar que cualquier equipo adicional que se conecte al bebe no le afecte físicamente por una variación eléctrica, cortocircuito, etc.

De acuerdo con la sección 201.9.6.2.102 Nivel sonoro de las alarmas audibles, el nivel de ruido producido por el ventilador durante el funcionamiento no debe exceder los 60Dba, además la señal de alarma debe tener un nivel sonoro de al menos 65dBA a una distancia de 3m perpendicular al frontal de mando en un local cerrado. La temperatura del equipo al estar en contacto con el paciente no debe exceder el 40°C , una vez que la temperatura exceda el valor especificado anteriormente, el equipo deberá desconectarse inmediatamente y activando una señal auditiva.

2.2.3. Incumplimiento de las normas

El incumplimiento de las normas de seguridad al fabricar un equipo médico o en el uso continuo del mismo puede ocasionar lesiones a los neonatos e incluso la muerte del bebe, por lo general las fallas que se producen en las incubadoras neonatales son las siguientes:

- En primer lugar, todos los equipos médicos, no solo las incubadoras deben tener puesta a tierra ya que por alguna falla eléctrica se produce una descarga y esta pueda ocasionar una lesión grave al paciente.
- Falla en los sensores de temperatura, tanto corporal como ambiental. Estas fallas son preocupantes por que pueden causar hipertermia, que es un aumento temperatura fuera de lo normal, e hipotermia, donde la temperatura del cuerpo se reduce, ambas causas pueden ocasionar la muerte del recién nacido.
- El ruido es el problema más común, esto se produce por las alarmas que no están calibradas adecuadamente o por el motor de ventilación y que afecta

directamente la audición del neonato. Normalmente se considera peligroso cuando el ruido dentro del interior de la incubadora supera los 60dB (AENOR, Enero 2010).

2.3. Características técnicas de los elementos electrónicos del prototipo

En esta sección se analizará cada uno de los componentes principales utilizados para la construcción de la incubadora, partiendo de las características técnicas de los elementos electrónicos y finalizando por un análisis detallado de estos. El sistema de control de temperatura de la incubadora neonatal está constituida por los siguientes componentes electrónicos:

- Tarjeta electrónica Arduino Mega.
- Tarjeta electrónica Arduino UNO.
- Shield LCD KEYPAD de Arduino.
- Shield Ethernet de Arduino.
- Sensor de temperatura LM35.
- Termistor NTC 10K encapsulado.

2.3.1. Tarjeta Arduino MEGA

El Arduino Mega es una placa electrónica basada en el ATmega1280 (Ver anexo 2). Cuenta con 54 pines digitales de entrada y salida (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 puertos serie, un cristal oscilador de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; simplemente conectarlo a un ordenador con un cable USB o un con el adaptador de AC o una batería DC para empezar (ARDUINO, Pagina Oficila, 2015). La Tabla 7 nos muestra características más específicas con respecto al Arduino Mega.

Tabla 7
Características Técnicas Generales del Arduino Mega

Microcontrolador	ATmega1280
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Entradas y Salidas Digitales	54 de las cuales las 15 primeras sirven como salidas PWM
Entradas Análogas	16
Corriente en las entradas y salidas digitales	40 Ma
Corriente DC en la entrada de 3.3VDC	50 mA
Memoria Flash	128 KB de los cuales 4 KB es utilizado por el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz

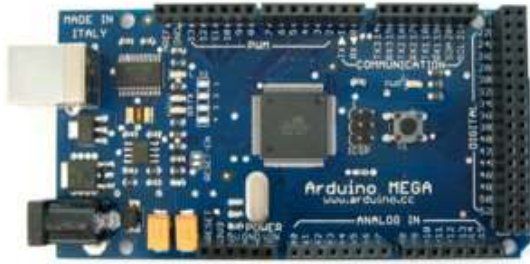
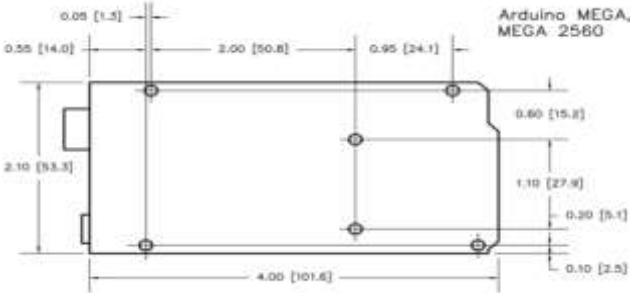
Fuente: (ARDUINO, Pagina Oficila, 2015)

Cada uno de los 54 pines digitales en el Arduino Mega se puede utilizar como una entrada o salida, utilizando **pinMode ()**, **digitalWrite ()**, y **digitalRead()**. Operan a 5 voltios, cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia de pull-up desconectado por defecto de 20-50 kOhms. Además, algunos pines tienen funciones especializadas como:

- Serial: 0 (RX) y 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) y 14 (TX). Se utiliza para recibir (RX) y transmitir datos en serie (TX) TTL.
- PWM: 2 a 13 y 44 a 46. proporcionar una salida PWM de 8 bits con la función **analogWrite ()** (ARDUINO, Pagina Oficila, 2015).

El Mega tiene 16 entradas analógicas, cada uno de los cuales proporcionan 10 bits de resolución (es decir, 1024 valores diferentes). Por defecto se miden desde 0 a 5 voltios, aunque es posible cambiar el extremo superior de su rango usando el pin AREF y su función `analogReference()` (ARDUINO, Pagina Oficial, 2015). El Arduino Mega se puede programar con el software de Arduino (Ver anexo 3). Los ATmega1280 en la Mega Arduino viene precargado con un gestor de arranque que le permite cargar nuevos códigos a él sin el uso de un programador de hardware externo.

Tabla 8
Características generales tarjeta Arduino Mega

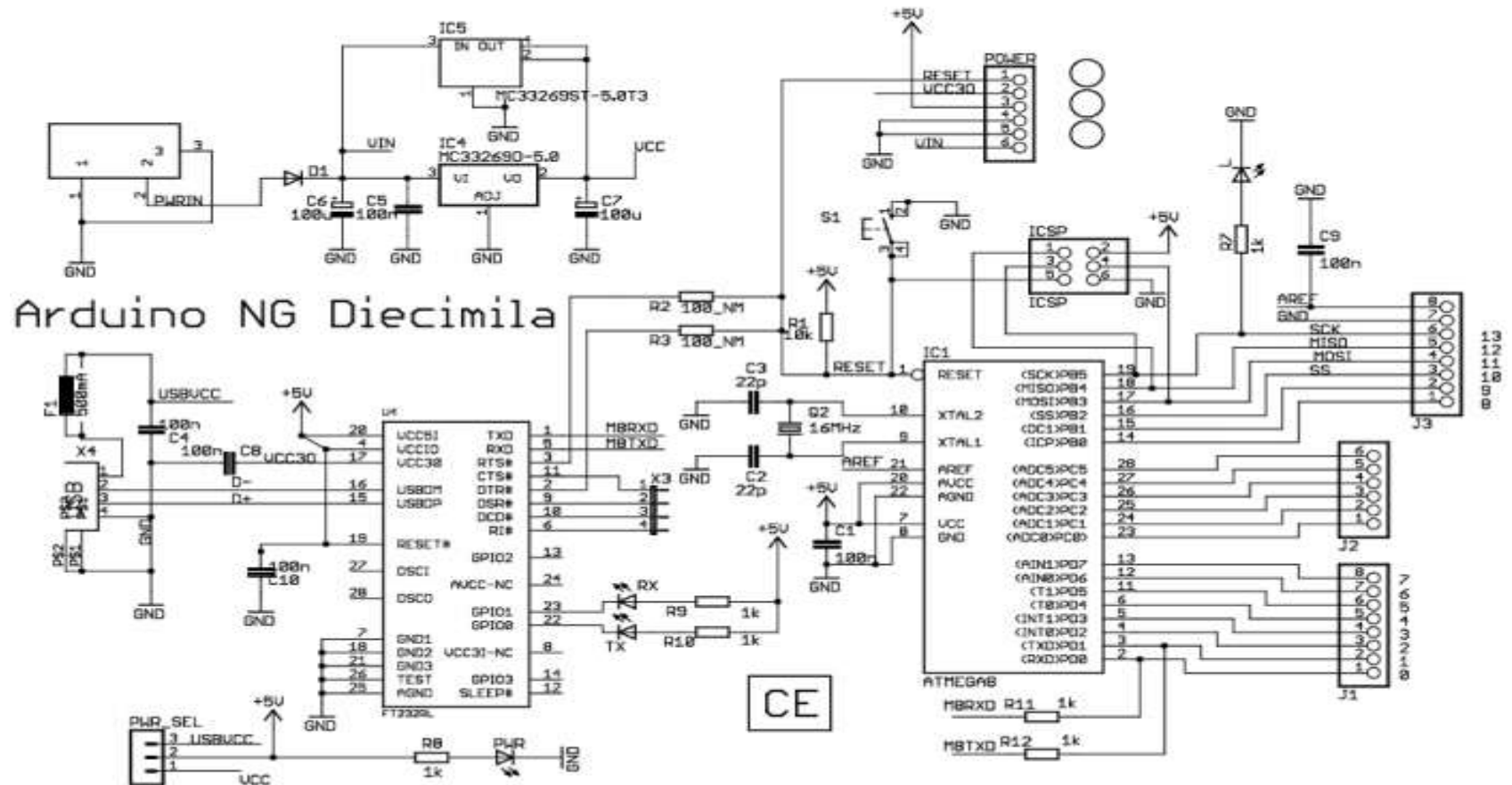
Tarjeta Arduino Mega	
DESCRIPCIÓN	
El Arduino mega es una versión ampliada de la tarjeta original Arduino y su funcionamiento se basa en el microcontrolador Atmega2560, dispone de 54 entradas/salidas de las cuales 14 se las puede utilizar como salidas PWM.	
ESTANDARES	
<ul style="list-style-type: none"> • Viene precargado con un gestor de arranque que permite cargar nuevos códigos sin necesidad de un programador externo. • Se comunica utilizando el protocolo STK500 original (referencia, archivo cabecera C). 	
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.	
Eficiencia	99%
Voltaje de alimentación	De 7-12 V DC
Corriente de entrada/salida	40 mA
Frecuencias de operación	16 MHz
Voltaje de salida secundaria	3.3V DC
DIMENSIONES (Pulgadas)	
	

2.3.2. Tarjeta Arduino Open Source

La plataforma Arduino es de hardware libre basada en una sencilla placa con entradas y salidas (E/S), analógicas y digitales. El elemento principal es el microcontrolador Atmegaxx8, un chip sencillo y de bajo coste que permite el desarrollo de múltiples diseños con las siguientes características técnicas:

- Voltaje de operación 5V
- Voltaje de entrada (recomendado) 7-12 V
- Voltaje de entrada (límite) 6-20 V
- Digital I/O con salidas PWM
- Entradas analógicas
- DC corriente I/O Pin 40 mA
- DC corriente 3.3V Pin 50 mA
- Memoria Flash 32 KB (2 KB para el bootloader)
- SRAM 1 KB
- Velocidad de reloj 16 MHz
- Entradas y Salidas análogas y digitales
- Salida PWM


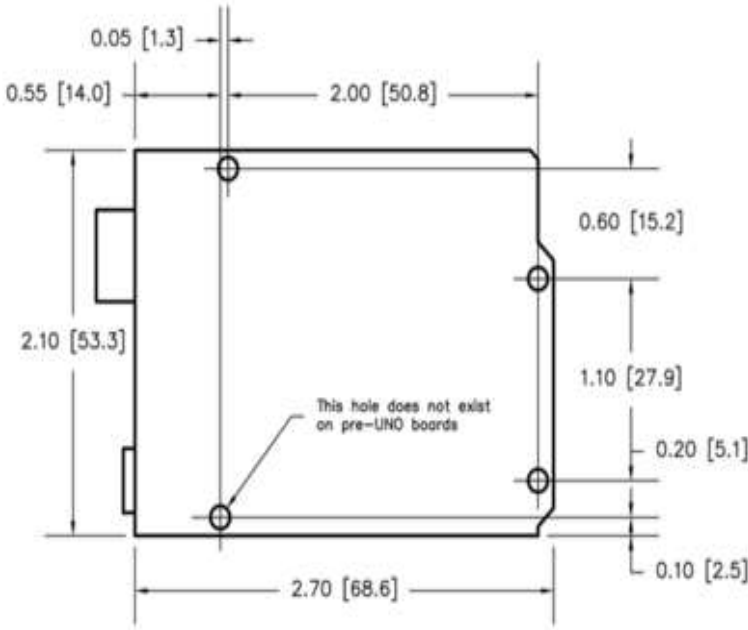
Las Entradas analógicas son de 10 bits, por lo que entregan valores entre 0 y 1023. El rango de voltaje está dado entre 0 y 5 volts, pero utilizando el pin AREF, este rango se puede variar a algún otro deseado (PNTIC, PLATEA, 2015).



Arduino NG Diecimila

Figura 2 Diagrama básico de la plataforma Arduino
 Fuente: (PNTIC, PLATEA, 2015)

Tabla 9
Características generales Arduino UNO

Tarjeta Arduino UNO	
DESCRIPCIÓN	
<p>El Arduino UNO es una versión más simple que la del Arduino mega, utiliza el microcontrolador Atmega328 y tiene 14 pines de entrada/salida de los cuales 6 son utilizadas como salidas PWM.</p>	
ESTANDARES	
<ul style="list-style-type: none"> Viene precargado con un gestor de arranque que permite cargar nuevos códigos sin necesidad de un programador externo. Se comunica utilizando el protocolo STK500 original (referencia, archivo cabecera C) 	
CARACTERISTICAS TÉCNICAS.	
Voltaje de alimentación	De 7-12 V DC
Corriente de entrada/salida	20mA
Frecuencias de operación	16 MHz
Voltaje de salida secundaria	3.3V DC a 50mA
DIMENSIONES (Pulgadas)	
 <p style="text-align: center;">This hole does not exist on pre-UNO boards</p>	

2.3.3. LCD KEYPAD SHIELD de Arduino

Este SHIELD LCD de Arduino es muy útil a la hora de implementar un circuito electrónico, hacer pruebas o laboratorios ya que se adapta a cualquier tipo de Arduino con una sujeción robusta, dejando la mayoría de pines disponibles para cualquier otra aplicación, recepción de señales o control de dispositivos. Esta placa tiene un potenciómetro para regular el contraste de la pantalla, un ICSP que sirve para conectar otros dispositivos Arduinos, 8 pines análogos disponibles, 5 pulsadores, un botón de reset y 5 puertos análogos disponibles como se puede apreciar en la Figura 3.



Figura 3 Partes constitutivas del SHIELD LCD ARDUINO

Fuente: (PROMETEC, 2015)

Los 5 pulsador del SHIELD LCD están conectados en serie con resistencias a un único puerto análogo A0, de modo que reconoce el botón pulsado mediante el valor de tensión que lee el puerto análogo, una forma de utilizar estos botones mediante código se aprecia en la Tabla 10.

Tabla 10
Uso del SHIELD LCD mediante código

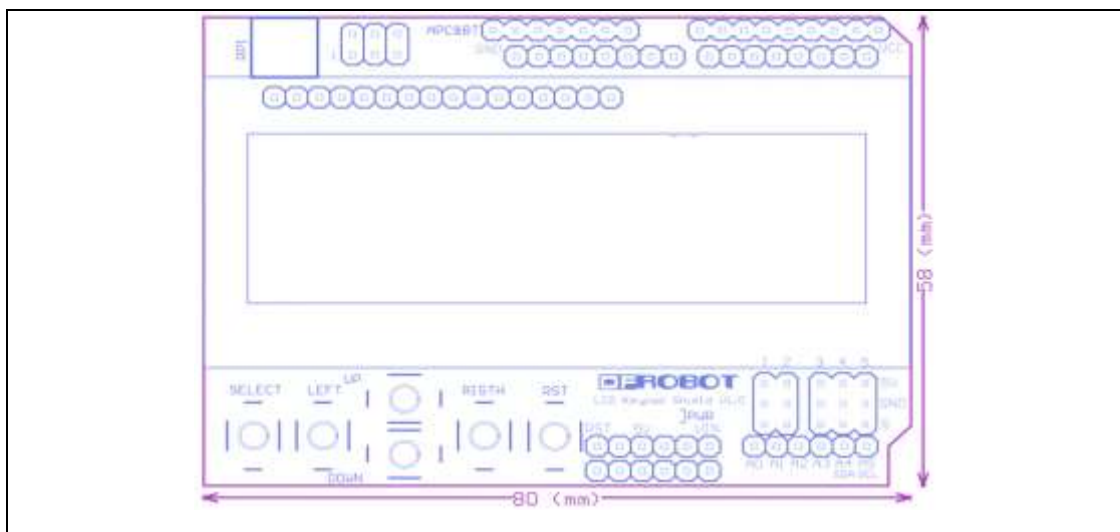
PIN	Función
Analog 0	Button(select, up, righth, down and left)
Digital 4	DB4
Digital 5	DB5
Digital 6	DB6
Digital 7	DB7
Digital 8	RS (Data or Signal Display Selection)
Digital 9	Enable
Digital 10	Backlit Control

Fuente: (PROMETEC, 2015)

Cuadro 1
Características generales del SHIELD LCD KEYPAD

SHIELD LCD KEYPAD	
DESCRIPCIÓN	
Esta es una tarjeta que se incorpora directamente a la placa Arduino, en este caso el SHIELD presenta una pantalla de 16x2 con un teclado de 5 botones y un reset por hardware.	
CARACTERISICAS GENERALES	
<ul style="list-style-type: none"> • Incorpora 5 botones de navegación. • Una pantalla LCD de 16x2 de retroiluminación blanca y azul. • La interfaz del teclado solo usa un canal ADC 	
CARACTERISTICAS TÉCNICAS.	
Voltaje de operación	5V
Pulsador reset	1
Potenciometro regulador de contraste	1
Expansión de pines análogos	6
DIMENSIONES (mm)	

Continúa 



2.3.4. Arduino ETHERNET SHIELD

El Arduino Ethernet al igual que SHIELD LCD se conecta directamente al cualquier tipo de microcontrolador Arduino sujetándose rígidamente, este módulo permite conectarse a la red a través de un cable RJ45 y siguiendo unas pequeñas instrucciones que se aclararan más adelante podremos enviar y recibir datos a la red a través de internet, los requerimientos de la placa se pueden apreciar en la siguiente Tabla 11.

Tabla 11
Requerimientos de trabajo del Arduino Ethernet Shield

ETHERNET SHIELD	
Requiere una placa Arduino	Arduino Uno y Mega
5V voltaje de funcionamiento	Suministrado por la placa Arduino
Controlador Ethernet	W5100 con buffer interno de 16K
Velocidad de conexión eee	10/100Mb
Conexión con Arduino	Puerto SPI

Fuente: (CORPORATION, ARDUINO , 2015)

LA Shield Ethernet que se aprecia en la Figura 4, tiene una conexión RJ-45 estándar, con un transformador de línea integrado y Power over Ethernet habilitado. Hay una ranura para tarjetas micro-SD a bordo, que se puede utilizar para almacenar archivos a través de la red. Es compatible con el Arduino Uno y Mega, el lector de tarjetas microSD a bordo, es accesible a través de la Biblioteca SD (CORPORATION, ARDUINO , 2015).

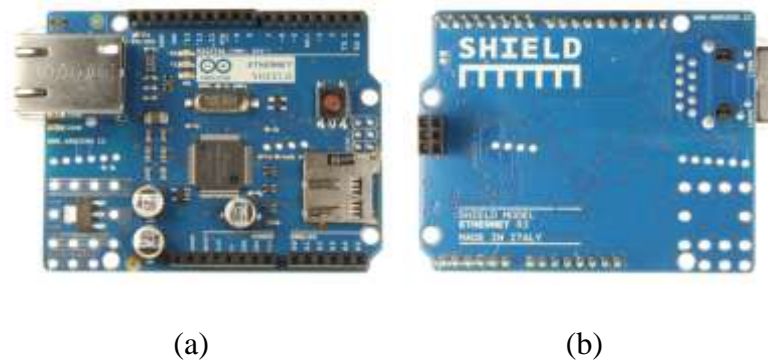


Figura 4 a) Ethernet shield frontal b) Ethernet shield trasera

La SHIELD incluye un controlador de reajuste, para asegurar que el módulo Ethernet W5100 se restablezca correctamente durante el encendido. La Shield actual tiene un Power over Ethernet diseñado para extraer energía de un cable Ethernet de par trenzado de categoría 5 convencional con las siguientes características:


- IEEE802 .3af compatible
- Ondulación baja producción y el ruido (100mVpp)
- Voltaje de entrada entre el rango de 36V a 57V
- Sobrecarga y corto circuito de protección
- 9V de salida
- Alta eficiencia convertidor DC / DC
- Aislamiento 1500V (entrada para la salida) (CORPORATION, ARDUINO , 2015).

El Arduino se comunica tanto con el W5100 y la tarjeta SD usando el bus SPI. Esto es en los pines digitales 10, 11, 12, y 13 en el Uno y los pines 50, 51 y 52 en los Mega. En ambas placas, el pin 10 se utiliza para seleccionar el W5100 y el pin 4 de la tarjeta SD. Estos pines no se pueden utilizar de forma general en las I / O de los Megs, el hardware SS del pin 53, no se utiliza para seleccionar el W5100 o la tarjeta SD, pero debe mantenerse como la interfaz SPI o si no funcionará de salida (CORPORATION, ARDUINO , 2015).

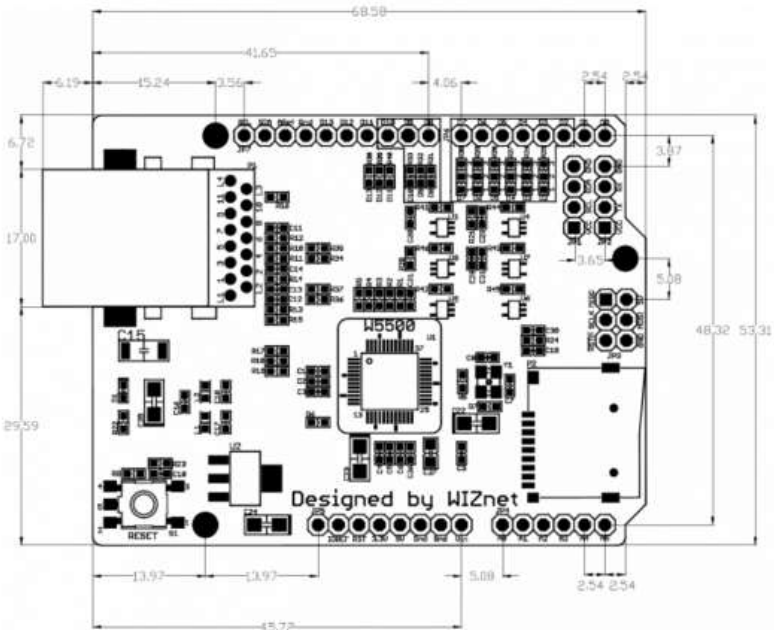
La configuración del Shield Ethernet se la realiza asignando una dirección MAC y una dirección IP mediante la función **Ethernet.begin ()**. Una dirección MAC es un identificador único global para un dispositivo en particular. Las Shields Ethernet actuales vienen con una etiqueta que indica la dirección MAC que puedes usar con los dispositivos (ARDUINO, 2015).

Para las Shields sin una dirección MAC específica se le asigna una al azar, esto debería funcionar, pero no se debe utilizar la misma para varias tarjetas. Las direcciones IP válidas dependen de la configuración de su red. Es posible utilizar DHCP para asignar dinámicamente una dirección IP a la Shield (ARDUINO, 2015).

Tabla 12
Características generales del Shield Ethernet

SHIELD ETHERNET	
DESCRIPCIÓN	
Es una tarjeta de conexión a la red para los sistemas Arduinos, utiliza un chip Ethernet Wiznet W5100 que provee una dirección IP. Esta tarjeta se conecta a los Arduinos a través de los espadines machos, posee un adaptador para memorias micro SD.	
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
<ul style="list-style-type: none"> • Para la conexión Ethernet se utiliza un conector Jack RJ-45. • La librería para su uso se incluye en el IDE de Arduino. • Tiene capacidad TCP y UDP. 	
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Conector	RJ45 Ethernet
Botón de reinicio	1

Continua 

Voltaje de alimentación	5V
INDICADORES LED	
PWR	Indicador de alimentación de la placa
LINK	Indicador de enlace de red-parpadea cuando está transmitiendo o recibiendo datos
FULLD	Indicador de conexión de red dúplex
100M	Indicador de conexión de red a 100Mb/s
RX	Indicador de recepción de datos (parpadea)
TX	Indicador de envío de datos (parpadea)
COLL	Indicador de colisiones (parpadea)
DIMENSIONES (mm)	
	

2.3.5. Sensor de temperatura LM35

Un sensor LM35 es un sensor de precisión de temperatura centígrada, su uso se basa en la lectura de la temperatura ambiental, la precisión del componente va acorde con la temperatura que se necesita medir dentro de la incubadora neonatal. Está disponible en varios encapsulados que son: TO-46, SO-8, TO-220 y la que se usó en la incubadora TO-92.

Tiene una ventaja frente a los circuitos integrados calibrados en grados Kelvin, ya que este componente sustrae una tensión constante a su salida para ajustarla a una escala centígrada. No requiere de un circuito externo para calibrarlo externamente, la baja impedancia de salida, la linealidad y su precisa calibración lo hace que se fácil

2.3.6. Termistor NTC 10K encapsulado

El termistor NTC 10K es un componente electrónico que basa su funcionamiento en adquirir la temperatura y convertirla en resistencia, es un elemento que brinda rapidez en la adquisición y confiabilidad en la lectura. Las características generales y técnicas de este dispositivo, así como las dimensiones se aprecian en la Tabla 14.

Tabla 14
Características generales Termistor NTC 10K encapsulado

TERMISTOR NTC 10K ENCAPSULADO	
DESCRIPCIÓN	
Es un tipo de sensor de temperatura, esta versión viene encapsulada para protegerlo de líquidos o condiciones de humedad, el sensor tiene una exactitud ± 1 ($-10^{\circ}\text{C}/85^{\circ}\text{C}$).	
CARACTERISTICAS GENERALES	
<ul style="list-style-type: none"> • Tiene un alambre aislado PVC • Resistente a la humedad • Respuesta rápida de temperatura • Alta estabilidad bajo cambios de temperatura 	
CARACTERISTICA TECNICA	
Voltaje de alimentación	3-5V DC
Rango de Medición	-30°C a 120°C
Longitud del cable	60cm
Valor beta	3950K
DIMENSIONES (mm)	
	

2.4. Características técnicas del sistema de control del prototipo

El control de temperatura se implementará en la tarjeta Arduino Mega la cual enviara señales de control a los actuadores 1 (ventilador) y 2 (niquelina) como se

parecía en la Figura 5, A continuación se analizara cada uno de los elementos que intervienen en el proceso de control de potencia de la Incubadora Neonatal.

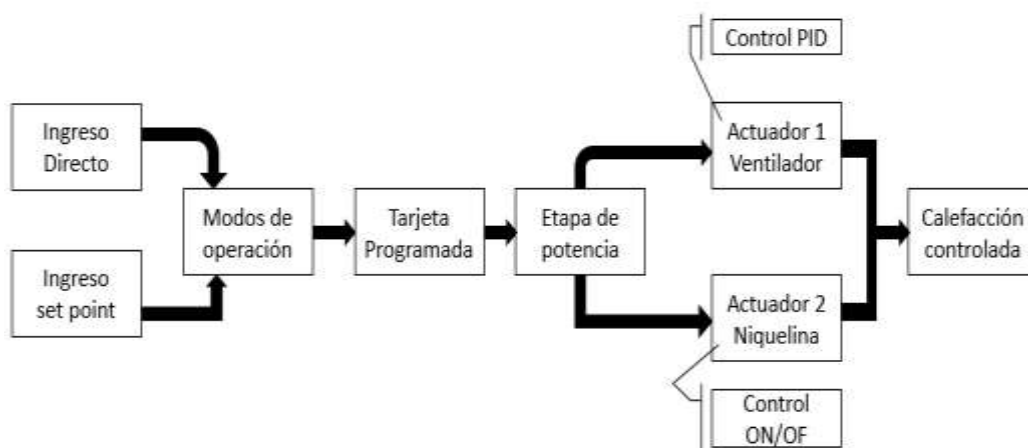


Figura 5 Diagrama en bloques de la etapa de potencia de la Incubadora

2.4.1. Niquelinas

Las niquelinas son de fabricación a base de níquel, el funcionamiento es básico, se conecta energía eléctrica que pasa a través del elemento, transformándose en calor. La cantidad de calor que emita la niquelina dependerá del tiempo que esté conectada a la toma eléctrica (TERMOKEW, 2015). De acuerdo a la ley de joule decimos que la cantidad de calor desprendido de una resistencia es directamente proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente y directamente proporcional al valor de la resistencia y al tiempo, en la Tabla 15 se muestran los diferentes tipos de resistencias eléctricas y los usos generales de las mismas (TERMOKEW, 2015).

Tabla 15
Características de las Resistencias Eléctricas tubulares

Resistencias Eléctricas Tipo Tubulares	
Tipos:	<ul style="list-style-type: none"> • Con tapón de 1,2,3,4,5,6 elementos • Aletas • Inmersión para agua • Inmersión para aceite
Diámetros:	5/16, 3/8, 1/2, 5/8 pulgadas
Usos:	<ul style="list-style-type: none"> • Inmersión en líquidos

Continua 

	<ul style="list-style-type: none"> • Calentamiento de aire • Túneles de secamiento • Hornos para pintura • Fundición de Plomo • Etc.
Componentes:	<ul style="list-style-type: none"> • Tubo de acero inoxidable • Niquelina • Protección de óxido de magnesio
Características técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de alimentación 120AC • Corriente de operación aproximado 12A • Potencia de operación 1500W

Fuente: (OMEGA, 2013)

El tipo de resistencia que se usó en el proyecto de investigación es de tipo industrial tubular como se muestra en la Figura 6, se la escogió por ser versátil y utilizada en un número de aplicaciones en las que tiene que ver sistemas de calefacción, además su diseño tubular lo hace un calefactor robusto y durable.

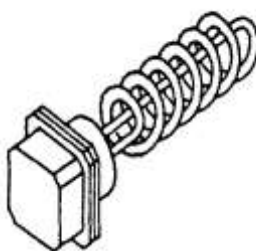


Figura 6 Resistencia Industrial tipo tubular

Fuente: (UNIOVI, 2015)

2.4.2. Ventiladores axiales

Los ventiladores axiales son comúnmente usados en ductos para sistemas de calefacción, estos ventiladores están compuestos de 2 a 13 paletas, conectadas a un eje movido por un motor. Existen tres tipos básicos de ventiladores axiales: helicoidales, tubulares y tubulares con directrices.

- **Ventiladores helicoidales:** se emplean para mover aire con poca pérdida de carga y su aplicación más común es la ventilación general, ver Figura 7.



Figura 7 Ventilador helicoidal

Fuente: (INTEREMPRESAS, 2015)

- **Ventiladores tubulares:** disponen de una hélice de álabes estrechos de sección constante o con perfil aerodinámico, montada en una carcasa cilíndrica. Pueden mover aire venciendo resistencias moderadas.
- **Ventiladores turbo axiales con directrices:** tienen una hélice de álabes con perfil aerodinámico montado en una carcasa cilíndrica que normalmente dispone de aletas enderezadoras del flujo de aire en el lado de impulsión de la hélice. En comparación con los otros tipos de ventiladores axiales, éstos tienen un rendimiento superior y pueden desarrollar presiones superiores (QUIMINET, 2006).

El ventilador de la incubadora neonatal NPI es de tipo helicoidal de 4 paletas, apropiado para enviar aire con la suficiente fuerza hacia el interior de la cámara. Este tipo de ventilador es usado comúnmente en áreas grandes para ventilación general por lo que puede cubrir el área interna de la incubadora con facilidad. La Tabla 16 muestra las características generales de estos ventiladores.

Tabla 16
Características Generales de los ventiladores helicoidales

Características	Rangos Aproximados
Velocidad	500 – 650 rpm
Potencia	½ - 1 HP
Voltaje de alimentación	2 – 12VDC

Continúa 

Nivel sonoro	65-74 dB
Velocidad	0.1 m/s

2.4.3. MOSFET para conmutación de potencia

El MOSFET funciona como activador de uno de los actuadores de la incubadora como se observa en la Figura 8, este dispositivo recibe la señal controlada de una de las salidas PWM de la tarjeta Arduino Mega para controlar la velocidad de giro del ventilador. Esto depende del valor testeado y de la lectura del sensor LM35 en modo automático o en el caso del sensor NTC10K en el modo servo controlador.

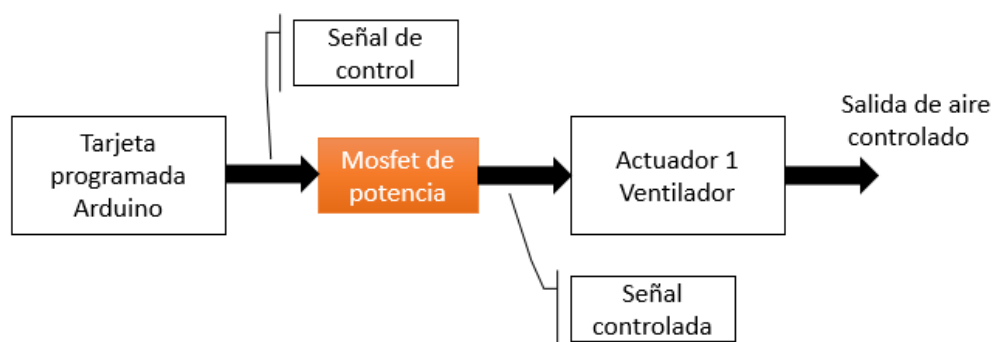


Figura 8 Diagrama en bloques del uso del MOSFET en la incubadora

Este dispositivo de potencia se lo utiliza comúnmente para controlar motores, led y otros dispositivos electrónicos, los MOSFET de potencia son componentes que permiten controlar corrientes elevadas. Los MOSFET consta de 3 terminales de salida: Drain, Source y Gate. El actuador se conecta entre source y drain mientras que el control del dispositivo se obtiene al aplicar una tensión en el terminal gate, esta tensión se la conoce como V_{gs} .

La configuración que se realiza a través de un microcontrolador y el MOSFET se puede apreciar en la Figura 9. La imagen muestra la salida de una señal hacia el dispositivo de potencia activando el led.

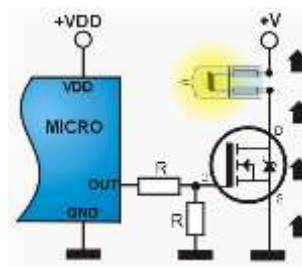


Figura 9 Conexión MOSFET con un micro

Fuente: (INVENTABLE.EU, 2010-2015)

2.4.4. Relé de estado solido

El relé de estado sólido es un activador de dispositivos de potencia, se caracteriza por tener una entrada de control que va desde 4V hasta 25V en DC y una salida de control en AC de 120V o 240V dependiendo del tipo de relé. La Figura 10 muestra el relé de estado sólido involucrado en el proceso de calentamiento de la incubadora neonatal.

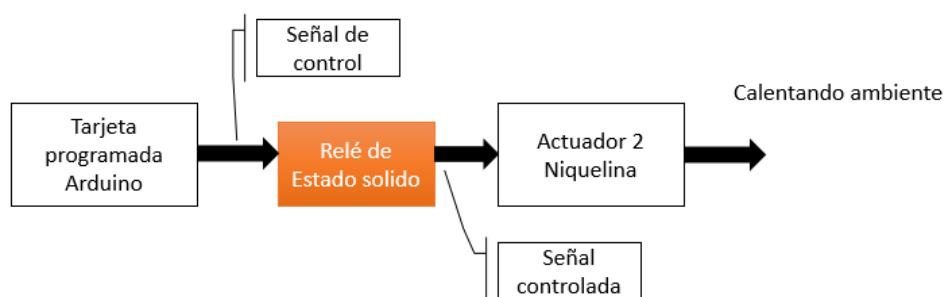


Figura 10 Uso del Relé de estado sólido en el prototipo

Las ventajas de utilizar los Relés de Estado Solido son las siguientes:

- Altas frecuencias de operación - son más rápidos.
- Su construcción sellada herméticamente los hace más resistentes a las condiciones ambientales.
- Son inmunes a choques y vibraciones
- Los Relés de Estado Solido no sufren de desgaste mecánico ya que no usan partes móviles.

- Son robustos, silenciosos, livianos y confiables.
- Pueden conmutar altas corrientes y voltajes sin producir arcos o ionizar el aire circundante.
- Generan muy poca interferencia.
- Manejan aislamientos del orden de kilovatios entre la entrada y la salida (BC, ELECTRICAS, 2010).

La Figura 11 muestra un tipo de Relé de estado sólido, tiene cuatro entradas, dos en la parte superior para conectar la carga y dos en la parte inferior para conectar la señal de control DC, dependiendo del relé el voltaje de activación varia de los 4 a 25 VDC.



Figura 11 Relé de estado sólido

Fuente: (BC, ELECTRICAS, 2010)

2.5. Sistema de Control PID utilizado en el diseño de la Incubadora Neonatal

Es necesario antes de abordar el método de control implementado en este proyecto, presentar una recapitulación de conceptos básicos de la teoría de sistemas de control y el método utilizado para encontrar los parámetros necesarios para el sistema de control PID.

2.5.1. Conceptos Generales

2.5.1.1. Sistema de control

Por definición un sistema de control se basa en un conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un mismo objetivo que en el caso de una incubadora neonatal,

es el control de la temperatura (CIE, ISA, 2015). La Figura 11 muestra un esquema general del funcionamiento que tiene un sistema de control, donde se observa que el control actúa directamente en el sistema ante la presencia de perturbaciones. La finalidad de un sistema de control es manipular las variables que intervienen en el sistema, de tal modo que estas puedan alcanzar valores prefijados y puedan controlar la planta o sistema.

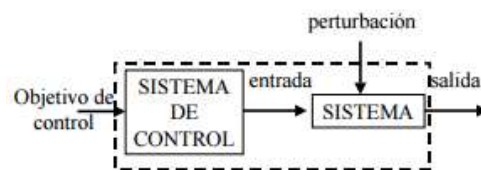


Figura 12 Esquema general de un sistema de control

Fuente: (CIE, ISA, 2015)

Un sistema de control debe ser moderadamente estable y una respuesta al amortiguamiento aceptable y los criterios que contribuyen a este sistema son los listados a continuación.

- Un sistema de control debe garantizar la estabilidad de la planta evitando los errores que se puedan producir.
- Debe ser lo suficiente bueno según los parámetros establecidos, es decir que las variables del sistema deben ser reales, evitan datos irreales en el sistema y comportamientos bruscos.
- De fácil implementación y manejo mediante un ordenador. (Ogata, 1999).

Un sistema de control está conformado de los siguientes elementos (Ogata, 1999):

- **Sensores:** son dispositivos de obtención de datos del sistema, se encarga de detectar magnitudes físicas y convertirla en una variable eléctrica.
- **Controlador:** Mediante los valores obtenidos por los sensores y el valor ingresado por el operador, se calcula los valores que se deben modificar de las variables de control en base a ciertas estrategias.

- **Actuador:** Mecanismo que actúa mediante la acción del sistema de control y que modifica las variables de los sensores (Ogata, 1999).
- **Planta:** Es un equipo o parte de él, que es controlado por una variable. Por ejemplo un tanque de agua donde se puede controlar el nivel del líquido que ingresa o la temperatura. A la planta también se le conoce con el nombre de proceso.

La Figura 13 ilustra el esquema de funcionamiento de un sistema de control en lazo cerrado, en el cual el sensor envía los datos adquiridos hacia el controlador y este envía una señal al actuador para que este controle el sistema, también podemos apreciar que el sistema pueda estar afectado por perturbaciones y esto es corregido ante la manipulación de las variables de control por parte del controlador.

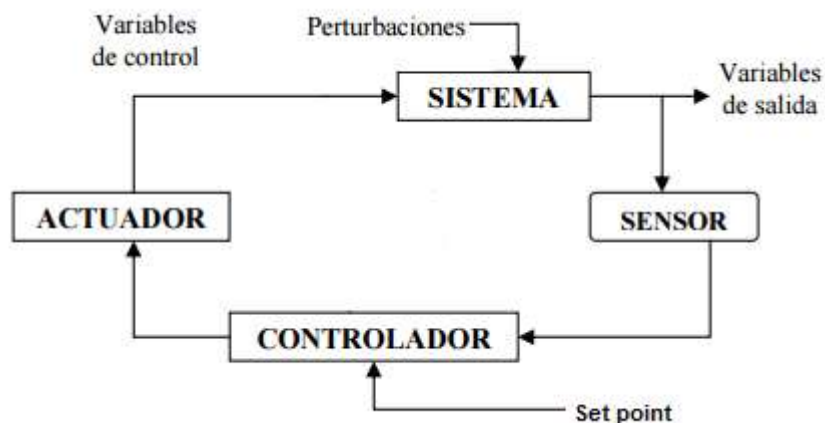


Figura 13 Esquema de un sistema de control con sus partes constitutivas

Fuente: (UPCOMMONS, 2015)

Un sistema de control se divide en dos métodos: un sistema de control en lazo cerrado y de lazo abierto. La diferencia radica en la señal de salida del control la cual tiene relación directa sobre la acción de control esto en lazo cerrado, ya que este controlador actúa ante la presencia de perturbaciones en el sistema, mientras que un sistema de control de lazo abierto ya no depende de la salida como el anterior sistema, básicamente la salida del controlador no tiene una relación directa con la entrada del controlador.

El sistema de lazo abierto es sensible a las perturbaciones del sistema, en cambio el sistema en lazo cerrado utiliza la retroalimentación para minimizar el error (Ogata, 1999). La respuesta de los sistemas de control, ante diferente tipo de entrada como escalón, rampa, parábola; permiten la dinámica temporal del sistema, y evaluar la respuesta transitoria y en estado estable del mismo.

La señal de entrada típica para evaluar el comportamiento del sistema es la entrada escalón porque permite conocer la reacción del sistema ante un cambio brusco en la entrada y conocer el tiempo que se tarda el sistema en estabilizarse. Una entrada de tipo escalón produce una señal de salida en la cual se definen varios parámetros que la caracterizan, tal como se puede observar en la Figura 14:

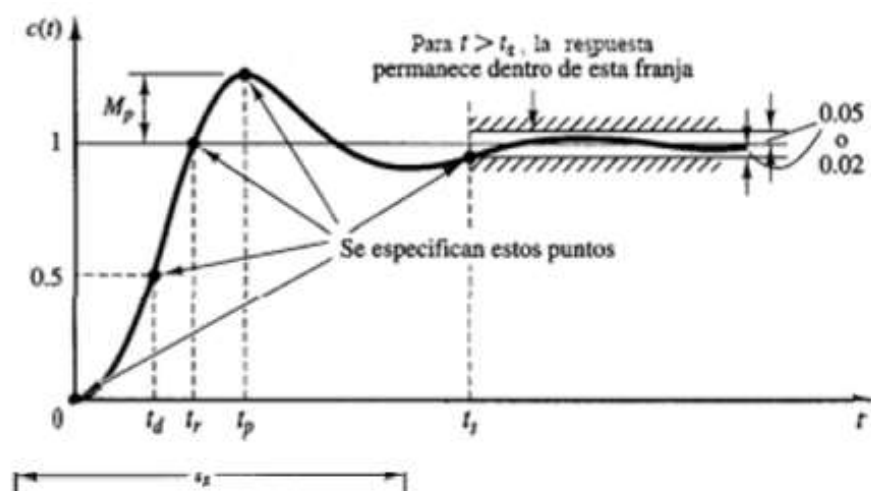


Figura 14 Señal de salida ante la presencia de una señal tipo escalón

Donde:

- **t_r o Tiempo de subida:** Es el tiempo que se demora la señal de salida del sistema en llegar a un 90% del valor final. El objetivo de conocer este valor, es saber que rápido responde el sistema ante una entrada.
- **t_p o Tiempo de pico:** Este valor se caracteriza por proporcionar el tiempo de se demora el sistema en alcanzar su punto máximo.

- **M_p o Pico de sobre oscilación:** Mide la amplitud del primer pico tomando como referencia el valor final en porcentaje. Es decir expresa cómo va evolucionando la señal de salida.
- **t_s o Tiempo de establecimiento:** Este tiempo indica cuánto tarda la señal de salida en ingresar al rango del 5% del valor final y que no vuelve a salir de ahí.

2.5.1.2. Control proporcional, integral y derivativo (PID)

Un control proporcional, integral y derivativo PID no es más que un control realimentado usado en sin número de aplicaciones donde el objetivo del sistema es calcular el error que se produce entre un valor medido y un valor de referencia (Bolton, 2001). Un controlador PID está conformado por tres acciones de control; proporcional, derivativa e integral, las mismas que son explicadas a continuación. Para entender el sistema de control PID digital que se implementará en la tarjeta Arduino se analizara cada una de las acciones que conforman dicho controlador.

2.5.1.3. Acción Proporcional

La Figura 15 muestra un controlador proporcional que claramente se encuentra sujeto a un lazo de retro alimentación con el objetivo de multiplicar la ganancia del sistema con la señal del error para lograr minimizarlo.

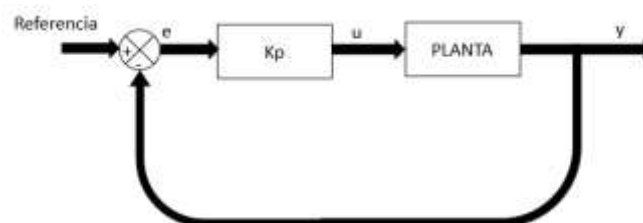


Figura 15 Control Proporcional

Una vez identificado el diagrama de bloques del sistema del control proporcional se puede identificar el error del sistema que es igual a la referencia menos $Y[K]$ que es la

medición en el instante, siendo la señal de control la multiplicación entre la constante proporcional por el error.

$$e[k] = Ref - Y[k]$$

$$u = k_p \times e$$

Como resultado de la acción proporcional en la planta va a ser que oscile alrededor del valor deseado como se observa en la Figura 16. Por si solo el control proporcional no es tan eficiente ya que va a oscilar sobre el valor deseado y podría en algún instante desestabilizar el controlador.

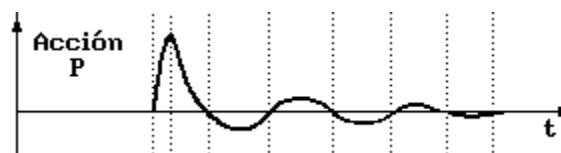


Figura 16 Señal de la acción proporcional

2.5.1.4. Acción Integral

La Figura 17 muestra un control de acción integral que basa su funcionamiento en resetear la señal ante la presencia de una señal de error o perturbación en el sistema, el inconveniente de este controlador es la lentitud de respuesta que tiene al iniciar la medición pero va cambiando mientras pasa el tiempo de muestreo.

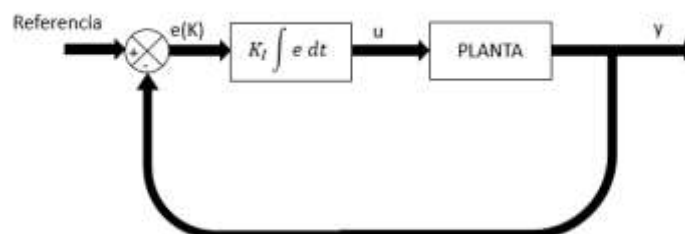


Figura 17 Sistema de control Proporcional e Integral

La acción integral calcula el área bajo la curva, es decir cuánto error se asume mientras la señal siga creciendo. La señal por ser discreta viene dada en rectángulos como se muestra en la Figura 18.

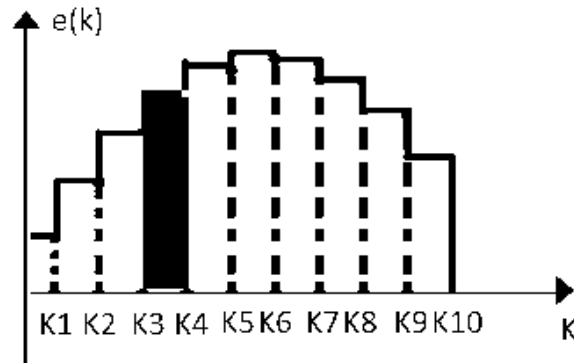


Figura 18 Señal discreta del error para la acción integral

Las ecuaciones que acompañan a la acción integral se toma en cada intervalo que se ha modificado la señal, como se aprecia en la Figura 20, el rectángulo que se encuentra sombreado es la incógnita en ese instante de tiempo, pero la idea es sumar todas las áreas de la señal para saber cuánto error existe y poder modificarlo.

$$e(K_4) \times T$$

$$e(K_4) \times [K_4 - K_3]$$

$$K_4 - K_3] = T \text{ Tiempo de muestreo}$$

$$e(K) = e(K) \times T + e(K - 1) \text{ Integral del error aproximado}$$

2.5.1.5. Acción Derivativa

La acción derivativa calcula la pendiente de la curva de la señal del error en un instante de tiempo, como se observó en la Figura 19, la señal de error que ingresa es discreta como en los anteriores sistemas, estos indica que la señal tendrá que ser medida en intervalos de tiempo. La acción derivativa solamente actúa cuando se

produce una variación brusca en la señal del error, si no es el caso este y la señal del error es constante trabajan los modos integral y proporcional.

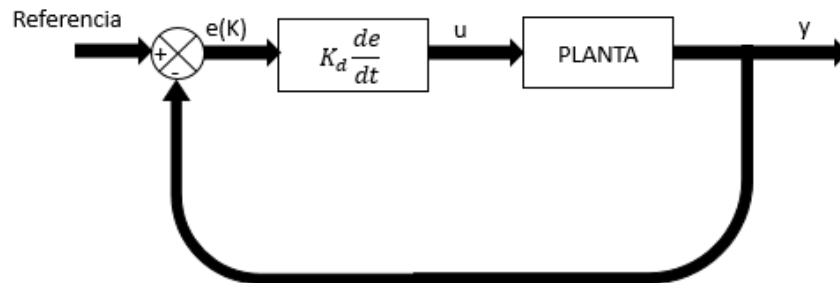


Figura 19 Sistema de control Acción derivativa

En la Figura 20 se muestra una señal de error discreta donde se aprecia claramente los dos puntos y la pendiente que se traza la cual es una incógnita hasta el momento, esta imagen permite identificar la ecuación que se aplicara en la tarjeta controladora y que se asemejara en este caso la acción derivativa.

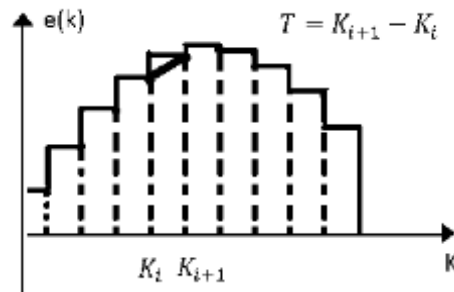


Figura 20 Señal de error Acción derivativa

La derivada para esta señal de error discreto es aproximadamente al error en el instante actual restando el error en el instante pasado dividido para el tiempo de muestreo, obteniendo la aproximación la parte derivativa de un sistema de control PID.

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(K_{i+1}) - e(K_i)}{T}$$

$$Der = K_D \frac{e(K_{i+1}) - e(K_i)}{T}$$

La acción derivativa basa su funcionamiento en reducir paulatinamente la señal del error con el mismo tiempo que se produce derivando la señal en el tiempo anticipándose a su reacción. Se aplica esta acción esencialmente en el arranque del proceso donde la señal de inicio suele ser demasiado brusca para el sistema. Analizado ya la acción proporcional, integral y derivativa se tiene como resultado un sistema de control capaz de actuar rápidamente ante una perturbación, la Figura 21 muestra el sistema de control PID completo, donde tiene las tres acciones sumadas para controlar la misma planta.

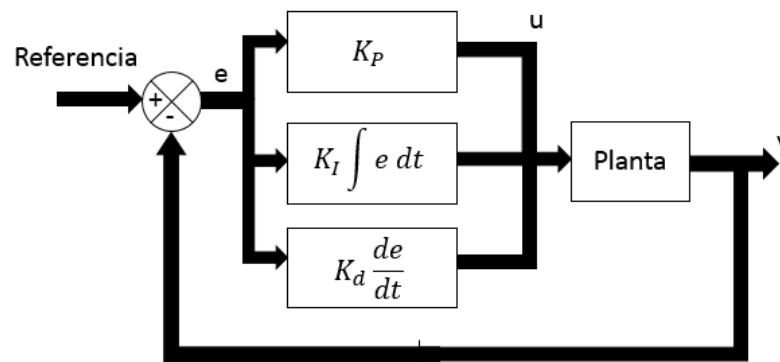


Figura 21 Sistema de control PID para un controlador digital

Ya teniendo las ecuaciones de cada acción de control, se tiene como resultado la suma de cada uno de los controladores es decir se sumara la parte integral, proporcional y derivativa obtenido como resultado la señal u de control de la planta.

$$\text{Proporcional} = K_p e[k]$$

$$\text{Integral} = K_i [e(K) \times T + e(K - 1)]$$

$$\text{Derivativa} = K_d \frac{e(K_{i+1}) - e(K_i)}{T}$$

Donde como resultado de la señal de control es la suma de los 3 controladores

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

Dando como resultado la siguiente función de transferencia:

$$C_{PID}(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Expresan la expresión (4) en su forma digital, entonces se obtiene

$$\text{control PID} = K_P e[k] + K_I [e(k) * T + e(k - 1)] + K_D \frac{e(K_{i+1}) - e(K_i)}{T}$$

Donde T es el periodo de muestreo, Kp la constante proporcional, Ki la constante integral y Kd la constante derivativa.

2.5.1.6. Sintonización de Controladores PID

La sintonización de controladores basa su funcionamiento en encontrar los parámetros que necesita un sistema para actuar inmediatamente ante una variación en el proceso que se esté realizando. Es importante conocer la naturaleza del proceso para identificar cual sería el mejor método de sintonización para ese tipo de planta. En este caso un método de ajuste clásico es el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols el cual trabaja en lazo abierto y lazo cerrado, esto para obtener los parámetros que necesita el controlador PID.

Este modelo es conveniente para sistemas particulares donde si la respuesta ante una señal escalón está dentro de los parámetros adecuados es aplicable este método empírico. El método que se aplicó para la implementación de la incubadora fue el desarrollado por Ziegler y Nichols, método que sirvió para encontrar los parámetros del controlador PID implementados en la tarjeta Arduino Mega.

2.5.1.7. Método de la curva de reacción Ziegler y Nichols

El método de la curva de reacción de Ziegler y Nichols es utilizado para determinar los valores de ganancia (Kp, Ki y Kd) del controlador PID que se implementa al diagrama de bloques de la Figura 20 correspondiente a una planta. La Figura 22 representa la curva del comportamiento correspondiente a la función de transferencia de la planta. El punto rojo de la figura muestra el punto de inflexión donde cambia el

sentido de la señal, y se traza una pendiente con el fin de encontrar los valores T y L en función del tiempo.

Una vez trazada la línea tangente en el punto de inflexión es necesario ubicar dos puntos, uno en el eje horizontal donde corta la línea tangente que corresponde a la variable independiente del tiempo mientras que por el otro lado se traza una línea donde el sistema ya sería estable pero con respecto a la línea tangente del eje vertical como se muestra en la Figura 22.

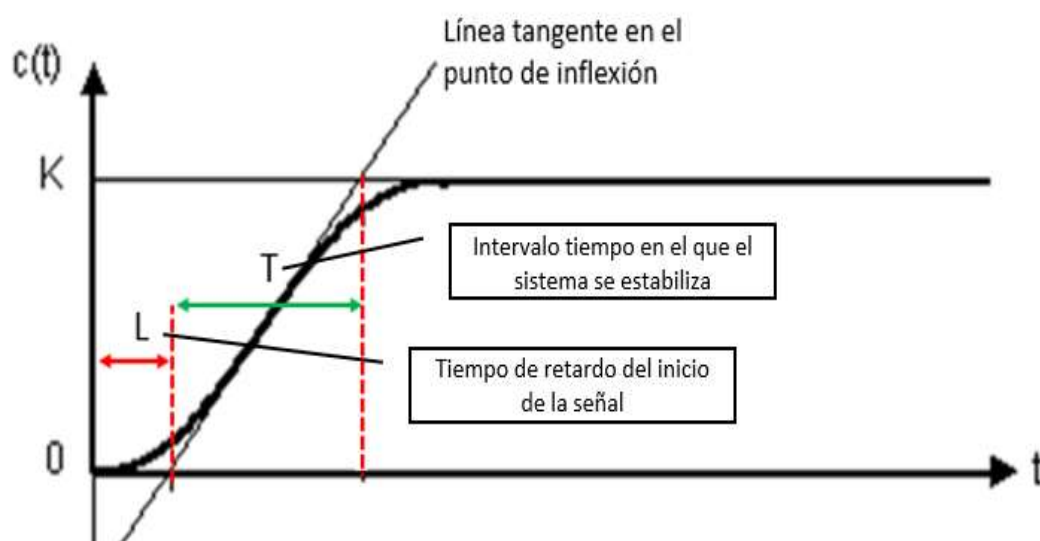


Figura 22 Análisis gráfico de la curva de respuesta del proceso

En la Figura 22 se puede identificar el parámetro L que es el tiempo de retardo antes que el sistema empieza a comportarse como se desea y va desde el origen es decir desde donde empieza la señal $G(S)$ de la planta hasta donde empieza la intersección con respecto a la línea tangente y el parámetro de T que corresponde a la variable independiente del tiempo que corresponde al intervalo desde donde está la intersección con el eje horizontal hasta la intersección donde el sistema se considera estable. Ziegler y Nichols propuso para el método de la curva de reacción los parámetros expuestos en la Tabla 17.

Tabla 17
Parámetros de Ziegler y Nichols

	K_p	T_r	T_d
P	$\frac{T}{L}$	_____	_____
PI	$\frac{0,9T}{L}$	$3L$	_____
PID	$\frac{1,2T}{L}$	$2L$	$0,5L$

CAPITULO 3

3. Diseño del Hardware del prototipo de Incubadora Neonatal

Este capítulo abarcará el diseño físico de la incubadora neonatal, como la base metálica donde se encuentra el conducto de ventilación, el diseño del habitáculo, la disposición de los sensores en la estructura y la colocación de la resistencia eléctrica. Tomando en cuenta la normativa internacional (Ver capítulo 2) de la cual se toma ciertas secciones para realizar el proceso de construcción de la misma.

3.1. Descripción

La estructura del prototipo de incubadora Neonatal se dividirá en dos partes una base metálica y una cubierta; La base metálica contendrá los sensores de temperatura, una niquelina, un ventilador, la entrada de alimentación de 110V, una abertura en la parte frontal para la placa principal donde se encontrará el sistema de control y una secciones en la base para almacenar los circuitos de control y el sistema de calefacción.

La cubierta del neonato según el inciso 201.3.205 Habitáculo del bebe de la norma UNE-EN 60601-2-19 estipula que el material de construcción debe ser transparente o si no sea ese el caso la mayor parte para poder observar el interior de la incubadora y al bebe, además debe ser resistente a temperatura o golpes que pueden alterar la naturaleza del material.

El tamaño del interior del prototipo dependerá del tamaño promedio de un bebe recién nacido que va desde los 50 cm en adelante, además se tomara en cuenta las aberturas en la base donde se encuentran los orificios de calefacción para que no afectare directamente al neonato, es decir el neonato se encontrará en el centro de la base dentro del equipo mientras que los orificios de calefacción en los extremos mejorando la circulación y así cubriendo toda la cubierta con la misma temperatura.

El interruptor térmico de protección del prototipo contra el exceso de temperatura del interior de la cubierta se encontrara en una de las secciones donde ingresa la

alimentación de 100V AC conectada en la línea para interrumpir la energía que va al equipo y por último se ubicara en la parte frontal del equipo un periférico de Ethernet donde el usuario podrá conectarse a la red para visualizar la temperatura corporal a través de su computador.

3.2. Requerimientos

El prototipo de incubadora neonatal deberá cumplir ciertas características tanto para la estructura del equipo como para el funcionamiento del mismo por lo que se ha optado por los siguientes requerimientos:

- La cubierta deberá ser transparente en su mayor parte para observar al neonato desde afuera.
- Deberá contener varios accesos, uno principal para el ingreso del bebe y uno accesos secundarios para la manipulación del neonato.
- La base deberá ser de material rígido que pueda soportar la cubierta del neonato y al bebe.
- Deberá tener accesos de ventilación tanto dentro como fuera del prototipo.
- Tendrá pulsadores que abrirán los accesos laterales con facilidad.
- Los espacios para la placa principal deberá estar centrada y en la parte delantera de la base del equipo.
- La alimentación del equipo deberá ser de 110V AC
- La protección contra temperaturas excesivas deberá activarse si sobre pasa los 40°C
- Un switch para activar la alimentación del equipo.

3.3. Diagrama de bloques de la estructura del prototipo de incubadora

Una vez revisado los requerimientos del prototipo, se muestra en la Figura 23 como se estructura los elementos en el prototipo de incubadora neonatal. El equipo se dividirá en tres etapas; primeramente la cubierta del neonato contara con accesos laterales ubicados a los costados, en la parte trasera y frontal, además tendrá botoneras para que el operador pueda ingresar los brazos dando un pulso para que se abra los accesos con facilidad, una entrada principal que dispone de una manija para que se pueda abrir la compuerta e ingrese el neonato y el material que se ha escogido para su elaboración ha sido el acrílico por su versatilidad, transparencia y durabilidad.

La base del prototipo que contiene los elementos que controlaran la temperatura del neonato será de un material resistente que soporte la cubierta y al neonato. En la base se ubicaran los sensores de temperatura además de contener el sistema de calefacción que se compone de dos actuadores una niquelina que estar ubicada en la parte central de la base y un ventilador en la misma ubicación para trasladar el aire caliente del ducto hacia el interior del habitáculo. La base tendrá una alimentación de 110V AC con su correspondiente botón de encendido y apagado del prototipo.

Por último se ubicara en la parte delantera de la base metálica una placa principal que contendrá un LCD indicador de modo y alarma cuando se produzca además de tener displays indicadores de ambiente y temperatura corporal del neonato, contando además con los botones de navegación de menú.

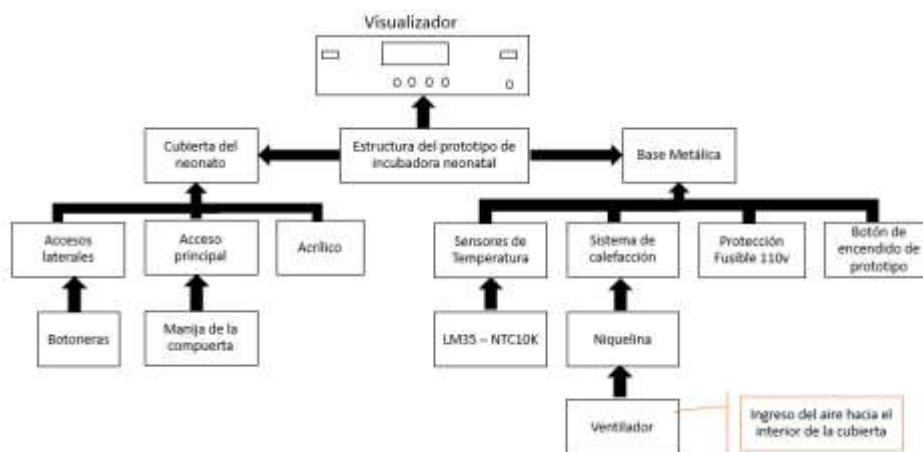


Figura 23 Diagrama de bloques de la estructura de la incubadora neonatal

3.4. Diseño del sistema mecánico y estructura de la incubadora

El diseño de la incubadora neonatal NPI se divide en dos partes, la cubierta del neonato y la base metálica del equipo en que se encuentra los distintos accesorios como se muestran en la Figura 24.

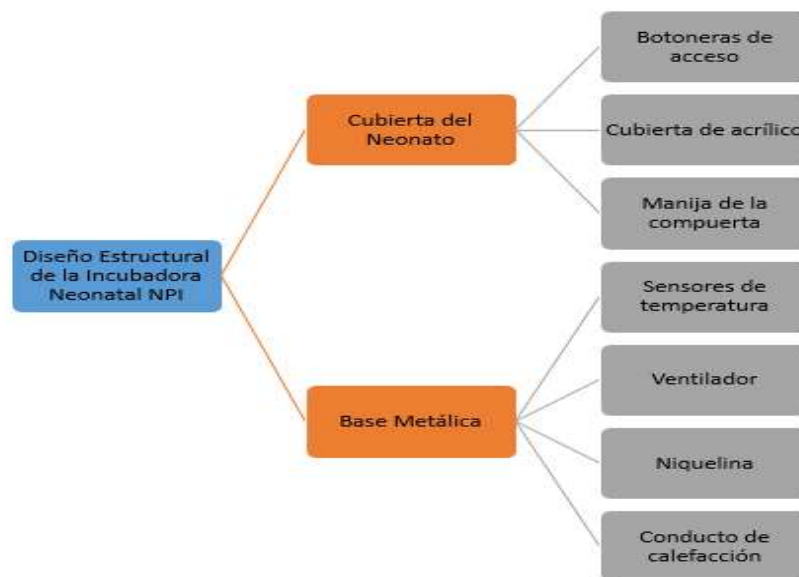


Figura 24 Diagrama en bloques del diseño de la incubadora neonatal NPI

La cubierta del bebe tendrá la siguiente disposición como se muestra en la Figura 25, un sensor de ambiente ubicado en la cubierta del bebe para recibir la lectura de temperatura. Él bebe ingresara por la compuerta principal ubicada en la parte frontal del equipo y dispondrá de 5 orificios para manipulación dentro de la cubierta, además el control de temperatura, niquelina y el ventilador estarán en el interior de la base metálica.

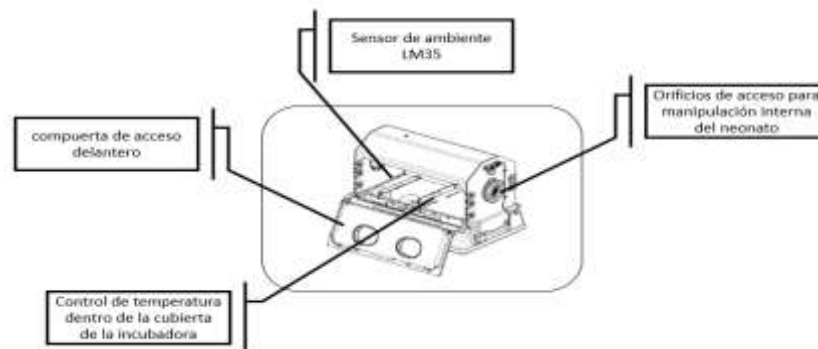


Figura 25 Diagrama de la disposición de elementos en la cubierta.

En el caso de la base metálica de la incubadora neonatal, esta tendrá un ventilador incorporado en la base de la estructura y transmitirá el calor de la niquelina por convección, es decir, enviara un flujo de aire caliente hacia el interior del habitáculo. Los sensores incorporados sensaran la temperatura y a través del microcontrolador se enviara una señal hacia el ventilador para que envíe un flujo de aire caliente o frio para que así se compense y se establezca la temperatura deseada. El diagrama en bloque de la Figura 26 muestra el proceso que sigue el aire hasta ingresar al interior de la cubierta donde se encuentra él bebe.

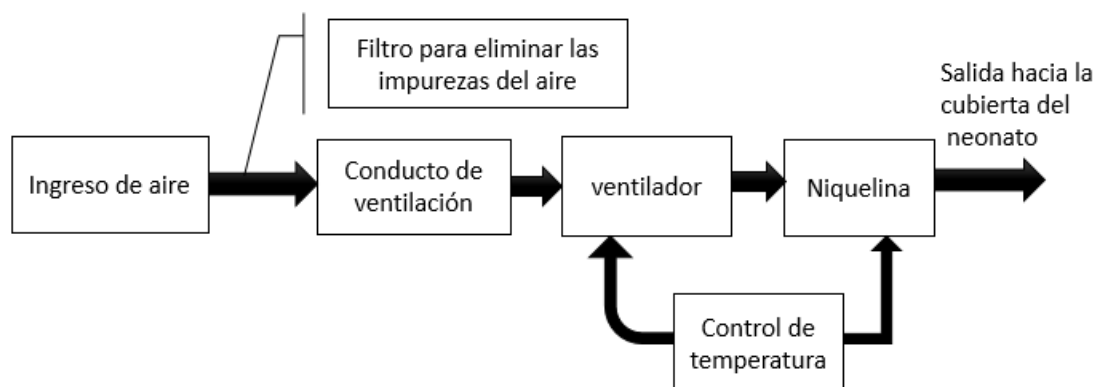


Figura 26 Diagrama en bloques del proceso de calefacción de la incubadora

De acuerdo a la norma UNE-EN 60601-2-19 el diseño del conjunto mecánico se realizó de manera que el proceso de control de temperatura y monitoreo siga las siguientes consideraciones:

- La temperatura que rodea al neonato debe estabilizarse en el valor establecido por el operador y no sobrepasar $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.
- La temperatura de estado inicial de la incubadora debe estar entre los 32°C Y 36°C .
- La precisión del sensor de temperatura del neonato no debe sobrepasar los $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
- Un sistema de alarma que indique el momento que un sensor está funcionando de una manera inadecuada y también de excesos de temperatura.
- Una niquelina que soporte una potencia de 1500W aproximadamente.

3.4.1. Diseño de la estructura física de la Incubadora Neonatal

Para la construcción del equipo se realizó dos secciones como se mencionó en el apartado anterior; la primera es la base metálica del equipo donde se encuentra la mayor parte de los accesorios de control y la segunda el diseño del habitáculo que es el área de protección que rodea al neonato. Las consideraciones de la estructura mecánica y de la cubierta del neonato se indican en la siguiente Tabla 18, donde se detalla las especificaciones técnicas de la construcción del equipo neonatal.

Tabla 18
Información técnica para la construcción del equipo neonatal

Elementos de la Incubadora	Características
Sistema Mecánico	El aire que ingresa al equipo debe pasar a través de un conducto que este filtrado y que retenga partículas de 0.5 micras o mayores.
Sistema de calefacción	Debe estar integrado por una niquelina y un ventilador para la circulación de aire.

Continua 

Cubierta del Neonato	De fácil visualización hacia el interior del equipo, material transparente, limpieza y mantenimiento.
Accesos	5 accesos para la manipulación del neonato y orificios para el ingreso de sensores sin necesidad de remover toda la cubierta.

Para el diseño de la estructura mecánica, de la cubierta del equipo se utilizó herramientas CAD en el software AutoCAD 2012. El diseño de la incubadora neonatal consiste en una base rígida de metal y una cubierta transparente de acrílico de 6 milímetros de espesor con las dimensiones que se puede apreciar en la Figura 27.

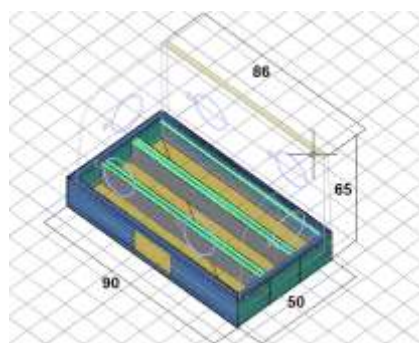


Figura 27 Estructura del Equipo Médico

La base de la estructura tiene dimensiones de 90cm de largo por 50 cm de ancho y con una altura de 65cm contando la cubierta del equipo, estas medidas se eligieron tomando en cuenta que las medidas estándares para una incubadora son de 90cm de largo, 40 cm de anchura y 45cm de altura; además estas dimensiones son adecuadas para que el tamaño promedio de un neonato pueda estar cómodamente en el interior del equipo (Ver anexo 1).

La base consta de 3 tres secciones, los números se pueden apreciar en la Figura 28. En la primera sección esta la entrada de alimentación del equipo así como el fusible de protección, en la segunda sección se encuentra la niquelina y el ventilador que a través de unos orificios en las tapas ingresa el flujo de aire al habitáculo y la tercera

sección se encuentran las tarjetas de control del equipo y las fuentes de alimentación. Estas secciones son cubiertas con tapas de 86cm de largo por 11cm de ancho.

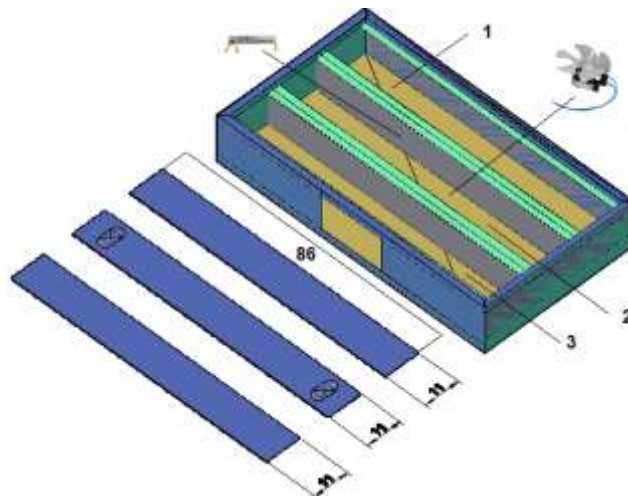


Figura 28 Base de la Incubadora neonatal

3.4.1.1. Diseño de la Cubierta de la Incubadora Neonatal

El diseño de la cubierta se muestra en la Figura 29, con sus medidas respectivas, la estructura posee en total 5 orificios que servirán para manipular al neonato, están colocados frontal, posterior y en uno de los costados. Existe además una puerta de acceso al interior para colocar al bebe.

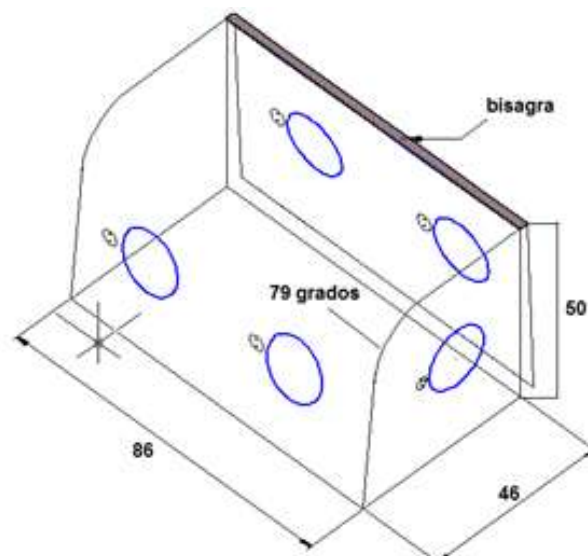


Figura 29 Cubierta del neonato

El diseño de los accesos al interior de la incubadora se aprecia en la Figura 30 tanto de la parte frontal, posterior y uno de los costados, cabe recalcar que para abrir las puertas se accionara el pulsadora que permitirá que se abra la puerta inmediatamente. Las dimensiones de los accesos son de 15cm de diámetro, tamaño adecuado para que la enfermera ingrese cómodamente con los guantes para manipular al bebe.

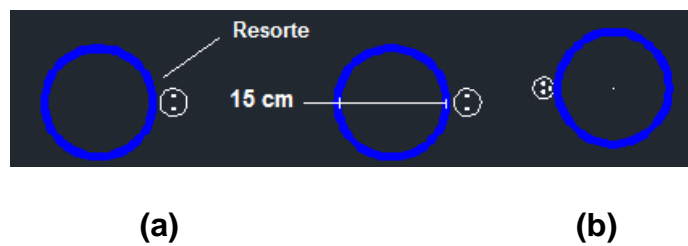


Figura 30 (a) Orificios compuerta (b) Orificios a los costados

El diseño final de la incubadora con todas sus piezas se muestra en la Figura 31.

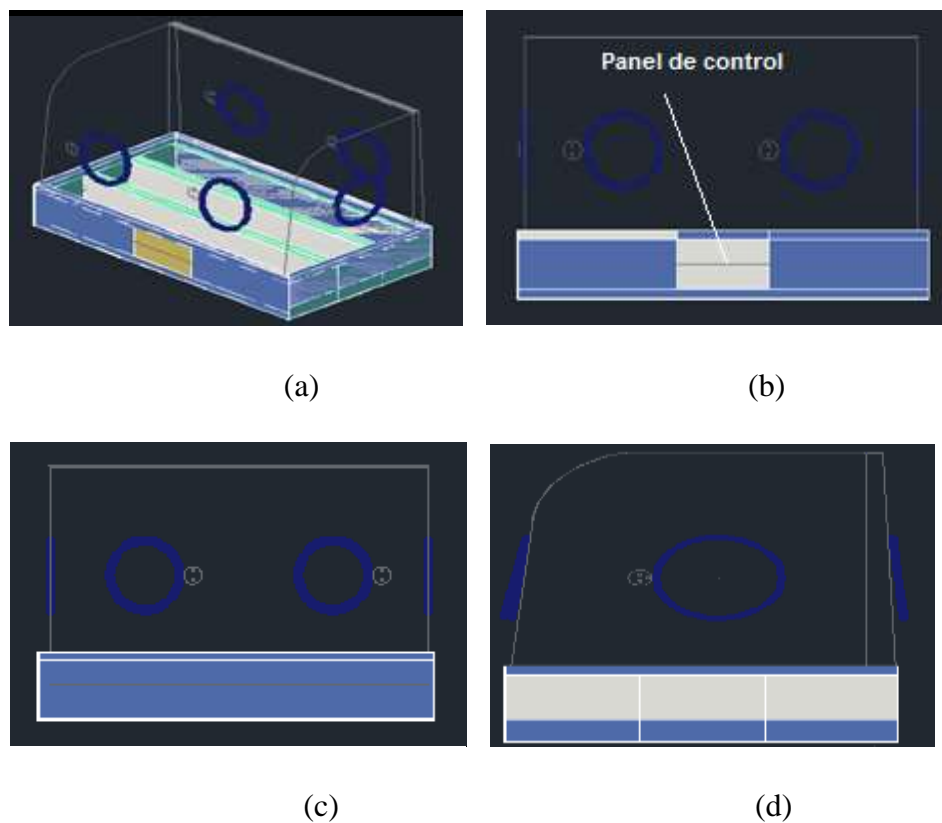


Figura 31 a) Vista general b) Vista Frontal c) Posterior d) Lateral

3.4.2. Diseño del sistema de calefacción para el control de temperatura.

El sistema de calefacción se ubicó en la sección central de la base, de esta manera el flujo de aire saldrá desde la parte central donde está ubicado al neonato, además el sistema de calefacción debe estar aislado de la parte de control y la parte de alimentación eléctrica. El cálculo del caudal se realizó tomando en cuenta la superficie central donde se encuentra el sistema de calefacción y la velocidad del ventilador como se detalla a continuación:

Superficie de la sección;

$$S = 80\text{cm} \times 10\text{cm} = 800\text{cm}^2 \times \frac{1\text{m}^2}{10000\text{cm}^2} = 0.08\text{m}^2$$

Velocidad del ventilador es 0.975 m/s y donde el caudal viene dada por:

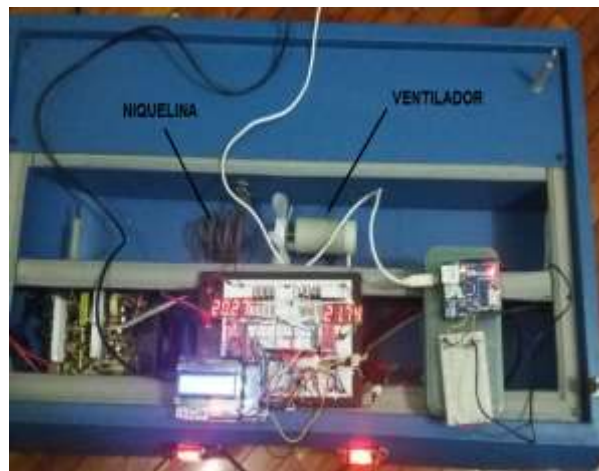
$$Q = S \times V = 0.08\text{m}^2 \times 0.975 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.078 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El conducto de ventilación de la incubadora neonatal dispone de un ventilador, una niquelina y una abertura en la parte lateral por donde ingresa el aire hacia el interior de la incubadora, este acceso cuenta con un filtro que evita que ingrese polvo al interior del habitáculo, generalmente estos filtros se los debe cambiar periódicamente por cuestión de mantenimiento y por seguridad del neonato.



(a)

Continua 



(b)

Figura 32 a) Orificios de ventilación b) vista niquelina y ventilador

El equipo consta de dos aberturas donde el flujo de aire ingresa al interior de la cubierta, de tal manera que recircule el aire caliente dando una mejor ventilación para el neonato. Tanto la niquelina como el ventilador producen la acción de calefacción; Estos actuadores están fuera del alcance del paciente mediante la tapa que se sobrepone en la sección central como se aprecia en las Figura 30.

3.4.3. Análisis de la posición de los sensores de temperatura y corporal.

Se usó 2 sensores para detectar la temperatura ambiental del Habitáculo y 1 un sensor para medir la temperatura corporal del bebe (ver capítulo 2). Estos dispositivos de medición cumple con los rangos de temperatura necesarios para la incubadora que básicamente van de 22 a 38 °C (Ver anexo 6).

La colocación del sensores de temperatura ambiente, corporal y calefacción como se indica en el capítulo 4 sección 4.2.1 se realizó de tal manera que pueda cubrir el área y se pueda obtener lecturas adecuadas cumpliendo la norma de fabricación de equipos médicos (Ver anexo 1) y que satisfaga las condiciones ambientales que el neonato debe tener que están descritas en el capítulo 2 sección 2.1.2. En la Figura 33, se puede apreciar la colocación de los sensores en la estructura del equipo.



Figura 33 Colocación de los sensores en la Incubadora Neonatal

Los sensores están colocados en dos ambientes importantes; el primero es dentro de la cubierta de la incubadora, situado en un extremo encima de la placa metálica, el sensor está colocado verticalmente con una separación de 4cm con la placa de tal manera que respondan inmediatamente al cambio de temperatura.

El segundo sensor se encuentra ubicado en el sistema de calefacción, sensando cambios con mayor rapidez los cambios producidos en la niquelina, el cual se encuentra en una posición horizontal con respecto a una de las placas de la basa metálica recibiendo directamente la calefacción del ducto de ventilación. Estos están protegidos por una capsula de plástico para que no se estropee por el uso u otro factor que pueda ocasionar que se dañe el sensor, esto se puede apreciar en la Figura 34.



(a)



(b)

Figura 34 a) Sensor sin capsula b) sensor con capsula

Finalmente la estructura física de la incubadora neonatal se puede apreciar en la Figura 33.



Figura 35 Estructura de la incubadora Neonatal terminada

CAPÍTULO 4

4. Diseño del software del Prototipo de Incubadora Neonatal

En este capítulo se explicara las características esenciales de algunos elementos principales que se usó en la construcción del sistema de control de la incubadora neonatal, así como también el proceso de modelamiento de la planta, el cálculo de las variables de control PID que se usó para controlar la velocidad del ventilador, así como otros elementos de interés. Además se presenta los requerimientos que según la normativa internacional de funcionamiento el sistema de control deberá cumplir.

4.1. Descripción

El software del prototipo se encargara de procesar las señales de los sensores de temperatura para mostrar esa información en los displays de temperatura ambiental y corporal, además se usará esa información para comparar estas lecturas con el setpoint ingresado por el operador o a su vez con el valor configurado si esta en modo de reposo. El software tendrá a su cargo los sensores de temperatura y los actuadores que son usados para calentar el aire que ingresara a la cubierta; niquelina y ventilador.

Las señales de los botones de navegación serán ingresados al software que estará contenido en la tarjeta Arduino Mega para el cambio de modos, además el software controla la función de alarma cuando no llega a la temperatura deseada en un tiempo establecido, activando una alarma audible que el software a través de un pulsador tendrá la opción de silenciarlo por un tiempo hasta que se corrija el error.

Un software secundario se utilizara en una tarjeta Arduino Uno con el objetivo de recibir la lectura del sensor corporal y a través de un dispositivo llamado Shield Ethernet conectado al Arduino enviará la temperatura del neonato por red generando una página web que se actualizara sucesivamente dependiendo de la velocidad del internet. Este software servirá de motorización a distancia y se podrá verificar el estado

de temperatura del cuerpo del bebe ingresando una IP especificada por el administrador de la red.

4.2. Requerimientos

Una vez identificado el proceso que deberá cumplir los controladores del prototipo se listará los requerimientos para un correcto funcionamiento del equipo:

- Se deberá cumplir con tres modos de trabajo; un modo de reposo, un modo automático y un modo servo controlado.
- En el modo de reposo no se ingresara el setpoint y la incubadora deberá establecer su temperatura interna en 36°C.
- Los rangos en las que el operador podrá manipular al temperatura será entre los 30°C hasta los 38°C, esto se aplica para el modo automático y el modo servo controlado.
- Contará con un modo de alarma que mostrara tanto visualmente como una alarma sonora que el prototipo está actuando mal y que se deberá verificar su funcionamiento.
- La temperatura configurada se deberá estabilizar desde su estado inicial en aproximadamente 15min, esto se debe a la norma UNE-EN 60601-2-19.
- La lectura de los sensores no deberán sobrepasar el 1% de error al compararla con la temperatura de referencia configurada por el operador.

4.3. Diagrama en bloques del software de control del prototipo

La Figura 36 muestra el proceso que siguen los elementos que aportan al control de temperatura y monitorización del prototipo de incubadora neonatal. Los elementos que ingresan al control principal Arduino Mega son los sensores de temperatura y los pulsadores de navegación, de la misma forma para el control de monitorización solo se ingresará la lectura del sensor NTC10K que mide la temperatura corporal del

neonato y va dirigida hacia la Tarjeta arduino Uno que a su vez enviará esa señal hacia la red que esté conectada en ese momento generando una página web de monitorización.

El software ingresado en la tarjeta Arduino Mega enviará las señales de control para los actuadores que modificaran la temperatura del interior del equipo y enviara la información necesaria a través de los displays, indicadores luminosos y el Shield LCD.

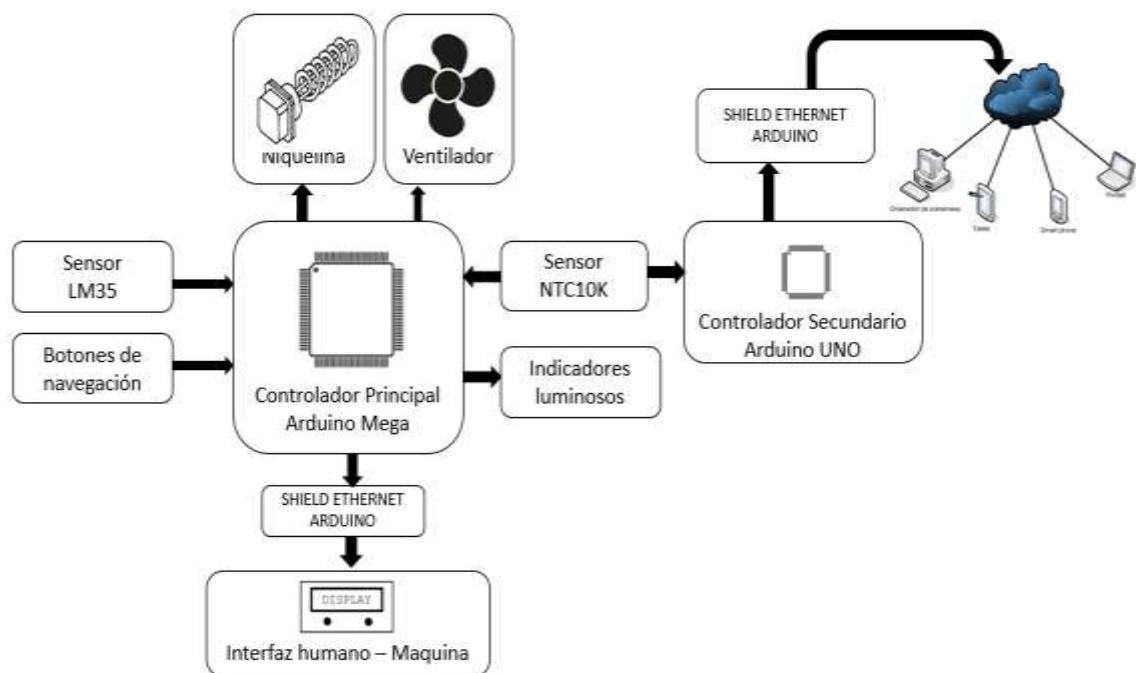


Figura 36 Diagrama de bloques del software de control del prototipo

4.4. Características del sistema de control de temperatura de la incubadora.

En la Figura 37 se muestra el esquema general de funcionamiento de la incubadora neonatal NPI. Como se puede observar, la incubadora presenta 3 modos de operación: un modo de reposo donde no interviene el operadora y se activa al encender el equipo, su funcionamiento se basa en controlar una temperatura de 36°C dentro de la cubierta.

El modo de operación automático y servo controlado requiere una intervención directa del operador indicando el modo mediante el panel de control. Una vez ingresado a este modo, el operador tendrá la opción de ingresar el set point. La diferencia de estos modos se presenta al recibir las lecturas de los sensores ya que el

modo automático recibe la señal del sensor NTC10K y en el otro modo del sensor LM35 como se aprecia en la Figura 37

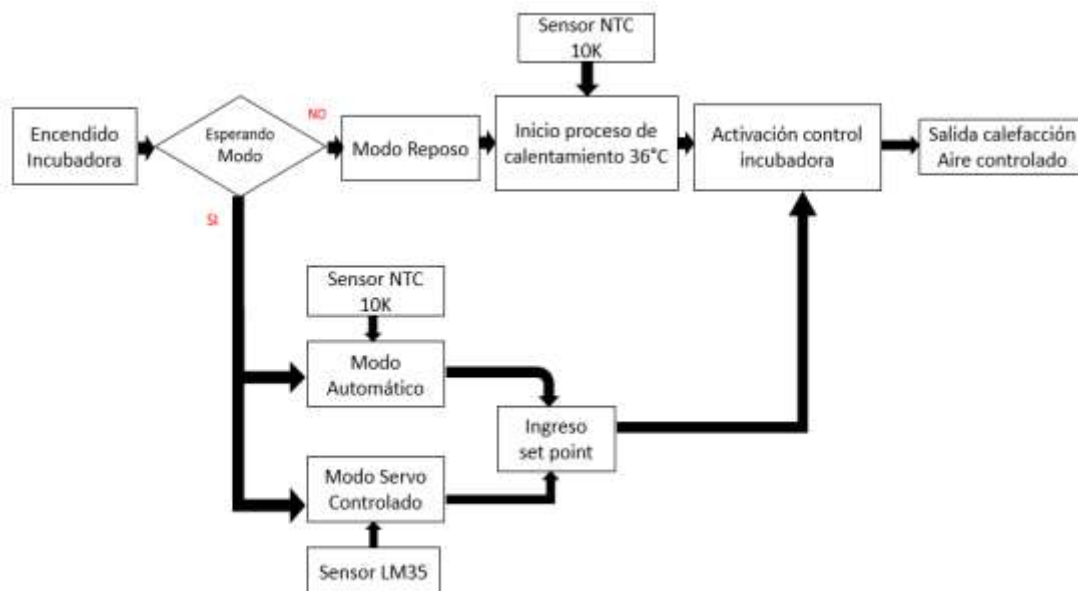


Figura 37 Estados de control de la incubadora neonatal NPI

El funcionamiento se basa en 3 modos, el primero se toma un valor de referencia de 36°C directamente al encender el equipo, esto se debe a que el equipo debe estar a esta temperatura inicialmente según Lo que estipula la norma UNE-EN 60601-2-19. Los dos siguientes modos el operador deberá ingresar el set point para que el sistema detecte los parámetros y mediante la tarjeta de control pueda enviar la señal al actuador, y controlar la salida de aire hacia el interior de la incubadora, ambos modos depende de la lectura de los sensores de temperatura LM35 y NTC 10K. Esto se explica en detalle en el capítulo 4 en la sección de diseño del sistema del controlador PID.

La Figura 38 muestra dos secciones del proceso de control de la incubadora neonatal; la sección principal interviene la tarjeta Arduino Mega que es la encargada de recibir la señal de los controladores y enviar la señal a los actuadores para realizar el proceso de calentamiento del aire que ingresa al interior de la cubierta de la incubadora.

Mientras que la segunda sección donde la tarjeta Arduino UNO se encargará de recibir la señal del sensor de piel y enviar esta información por un cable de red a un

modem y llevarla hacia la nube para que se pueda retransmitir en todos los computadores que tenga la dirección establecida por el programador.

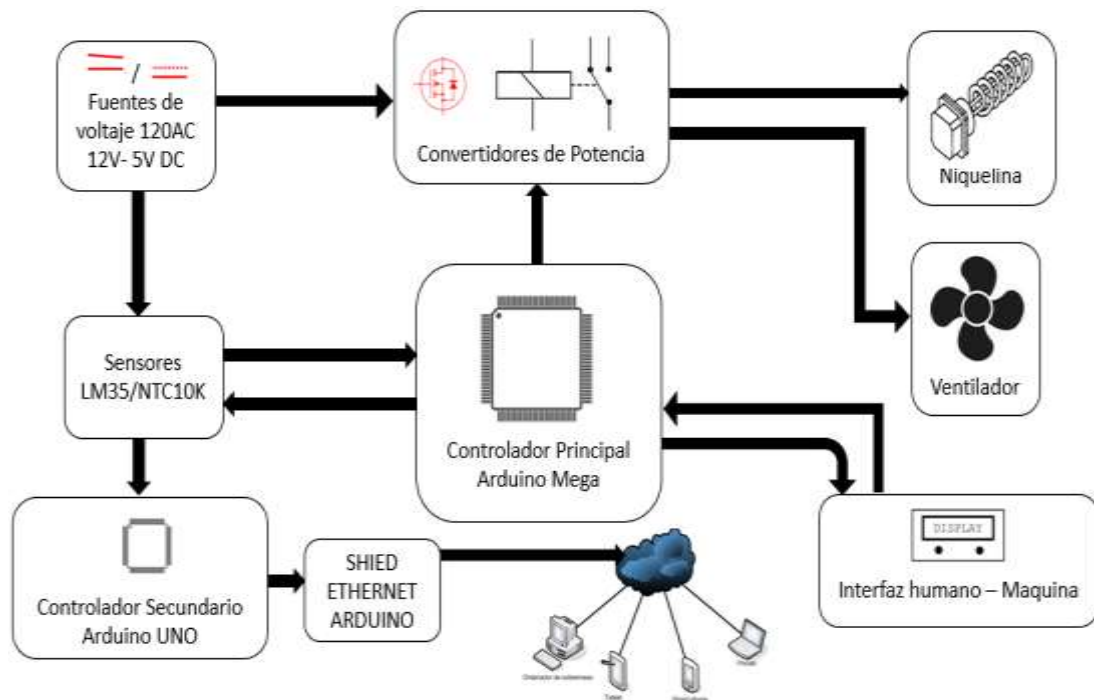


Figura 38 Implementación de los elementos del sistema de control

4.4.1. Dimensionamiento de los elementos principales del prototipo

En el capítulo 2, se detallaron las características técnicas de los elementos constitutivos de la incubadora como son: tarjetas de control, sensores, actuadores que en este caso es son ventilador y el relé de estado solidos que activa y desactiva la niquelina. A continuación se explicará el uso, dimensionamiento y características particulares de los dispositivos aplicados a la incubadora neonatal NPI.

4.4.1.1. Fuente de Alimentación

Se utilizó una fuente conmutada para la alimentación del panel de control, las características técnicas satisface la carga eléctrica del equipo como se puede apreciar en la Tabla 19.

Tabla 19
Características técnicas de la fuente de alimentación

Voltaje de entrada AC	100-120V / 7A 50 – 60 HZ
	200-240V / 3.5A 50-60 HZ
Voltaje de Salida DC	+3.3V / 14 +5V / 22 A MAX
	+12V / 10 A -12V / 2 A MAX
Potencia de salida	200W
Temperatura ambiental	50 °C

Esta fuente suministra energía a las tarjetas de control, sensores y actuadores de la incubadora neonatal, se escogió esta fuente de alimentación por su bajo costo en el mercado y que además tiene 3 distintos voltajes de alimentación que son: +5V +12V -12V los cuales intervienen directamente en la tarjeta de control. Dispone de un fusible de protección que protegerá los circuitos electrónicos ante una variación de voltaje o cualquier corto que se produzca en el equipo por una errónea manipulación del operario. La fuente conmutada alimenta varias secciones del sistema de control de la incubadora, cada una de estos elementos se alimenta con diferentes voltajes como se muestra en la Figura 39.

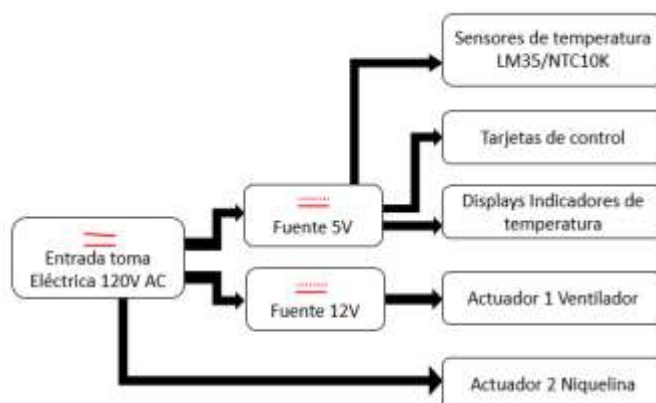


Figura 39 Voltajes de alimentación y los elementos alimentados.

4.4.1.2. Tarjetas de control

La tarjeta **Arduino Mega**, cuyas características técnicas se detallan en el Capítulo 2, es uno de los dispositivos usado para la adquisición de las señales de los sensores de temperatura y envío de señales de control. Este dispositivo se encarga de manipular un SHIELD LCD que se detalla en el mismo capítulo, permitiendo mostrar el menú de control de la incubadora como se aprecia en la Figura 40. Ambos dispositivos se conectan uno encima del otro a través de los conectores incorporados en las tarjetas

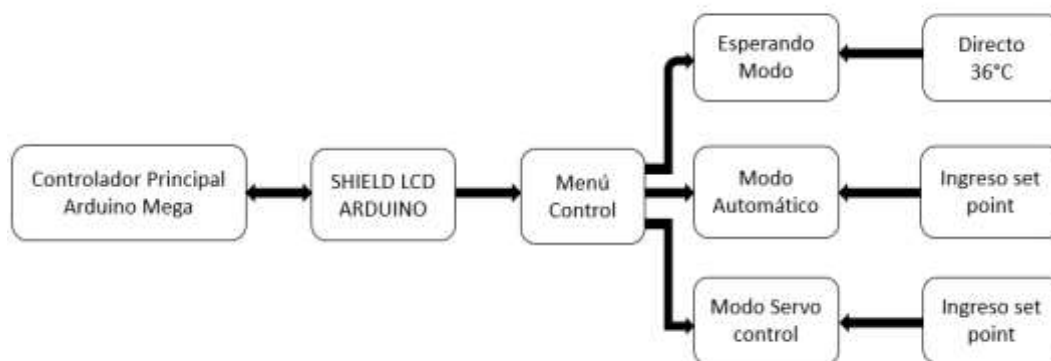


Figura 40 Relación entre el Arduino mega y el SHIELD LCD

Se usó una segunda tarjeta para no cargar de código el dispositivo principal pudiendo causar problemas de funcionamiento y que pueda alterar la lectura de los sensores. Este segundo Arduino es básico y de menor costo, se llama **Arduino Uno** (ver detalles técnicos en el capítulo 2). Este dispositivo se usó para conectar un SHIELD de Arduino llamado Ethernet el cual sirve para enviar y recibir datos por internet como se aprecia en la Figura 41.

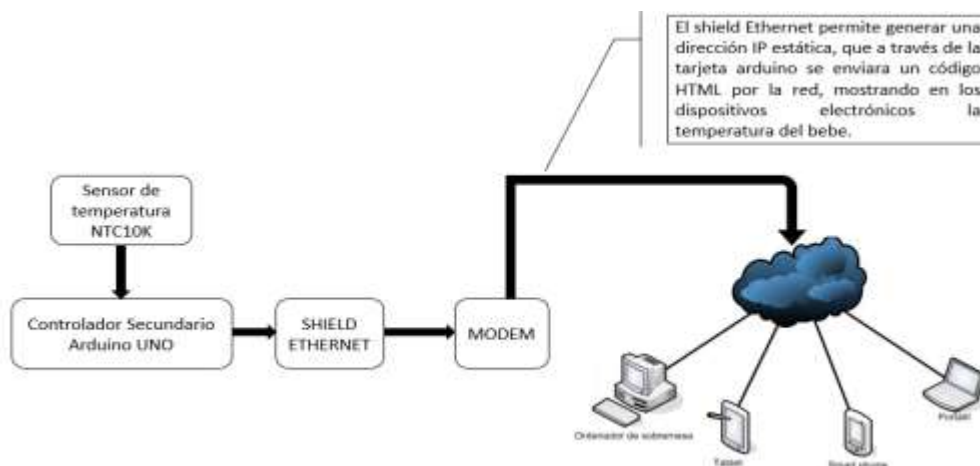


Figura 41 Proceso de envío de la lectura del sensor corporal por la red

La función principal de este Arduino es monitorear el sensor corporal NTC10K del neonato y enviar esta información a una página web, la cual tiene acceso la enfermera permitiendo reaccionar inmediatamente ante cualquier cambio brusco de temperatura.

4.4.1.3. Ventilador Helicoidal

Para el control de flujo de aire de la incubadora se usó un ventilador helicoidal cuyas características técnicas se detallan en el capítulo 2. El ventilador es controlado por la tarjeta Arduino a través de una salida PWM y un activador MOSFET (Ver anexo 5), que regulan la velocidad del motor hasta llegar al set point establecido por el operador, la Figura 42 muestra este proceso.

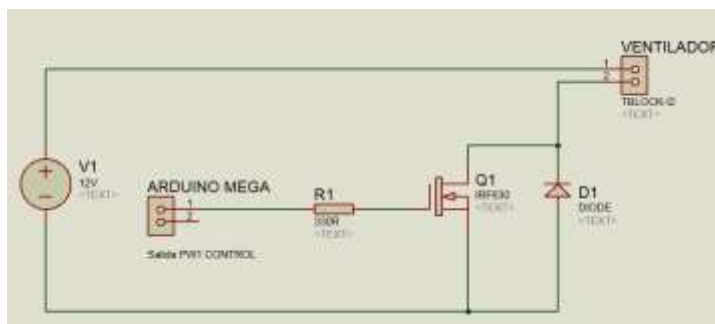


Figura 42 Activación del ventilador de la incubadora

El ventilador es alimentado por una fuente DC de 12V que se activa una vez encendido el equipo, la Figura 43 muestra el dispositivo encendido en la incubadora.



Figura 43 Ventilador en funcionamiento del prototipo

4.4.1.4. Cálculo de la resistencia de la niquelina a temperatura ambiente

La niquelina usada en el prototipo de incubadora es de fabricación artesanal de tipo industrial, se detalla en el capítulo 2. Esta resistencia se activa a través de un relé de estado sólido, su control depende del set point marcado por el operador y de la salida de la señal de control del ventilador, ambos dispositivos están directamente relacionados por código (Ver anexo 8). Para dimensionar la niquelina se utilizó la fórmula de la variación de la resistencia con la temperatura, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$R = R_0 \times (1 + \alpha * t)$$

Donde R_0 es la resistencia a 0°C y R la resistencia a la temperatura que queremos llegar, mientras que α es el coeficiente de temperatura del conductor, el cual en este caso el coeficiente que se usó fue de la niquelina 0.0002 (ELECTROZONA, 2015).

Datos:

$$\alpha = 0.0002$$

$$t_0 = 20^\circ\text{C}$$

$$t_f = 40^\circ\text{C}$$

$$V = 110V$$

$$t_o = 20^{\circ}C$$

$$R_o = 8\Omega$$

$$t = t_f - t_o$$

$$R = R_o \times (1 + \alpha * t)$$

$$R = 8\Omega * (1 + 0.0002(40^{\circ}C - 20^{\circ}C))$$

$$R = 8.032\Omega$$

Por lo que la potencia de la resistencia eléctrica es:

$$P = \frac{V^2}{R} ; P = \frac{110^2}{8.032\Omega} = 1506.47W$$

Teniendo como resultado un consumo de corriente de:

$$I = \frac{P}{V} ; P = \frac{1506.47W}{110V} = 13.69A$$



Figura 44 Niquelina incorporada en el equipo

4.4.1.5. Configuración de sensores de temperatura de la incubadora

Temperatura ambiental

Para sensar la temperatura del área que cubre al neonato se utilizó un sensor de precisión de temperatura centígrada **LM35** el cual tiene una precisión calibrada de

0.5°C y abarca un rango de -55°C a +150°C, el mismo que está calibrado en grados Celsius, por lo que no requiere de un circuito externo para añadirlo a algún montaje.

Para el acoplamiento del sensor con la entrada análoga del micro controlador se utilizó un amplificador operacional LM358 el cual tiene como objetivo acoplar las impedancias en el sensor y el conversor análogo / digital del Arduino, incluso se puso un capacitor de un 1µf en serie con una resistencia entre la salida del sensor LM35 y tierra para estabilizar la señal al sistema como se muestra en la Figura 45.

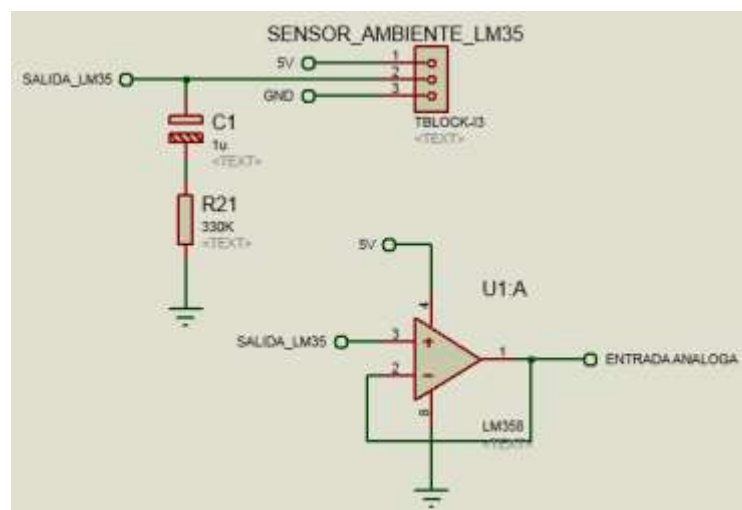


Figura 45 Configuración del sensor de Temperatura Ambiental

4.4.1.6. Temperatura del sistema de calefacción

Para sensar la temperatura del sistema de calefacción se utilizó un sensor LM35 por que el rango de operación está dentro del rango de trabajo del dispositivo, el objetivo de utilizar un sensor en los conductos de ventilación es monitorear la temperatura de la níquelina, ya que es un riesgo mortal para el neonato que la temperatura bajara de 35 °C.

De la misma forma que el sensor de temperatura ambiental, el LM35 tiene la misma configuración, en este caso las salida del sensor se conectó una resistencia en paralelo

con la tierra del circuito para filtrar la señal del sensor evitando posibles interferencias y lecturas fantasmas, también para acoplar esta señal con el micro controlador se utilizó un amplificador operacional LM358 como se muestra en la Figura 46.

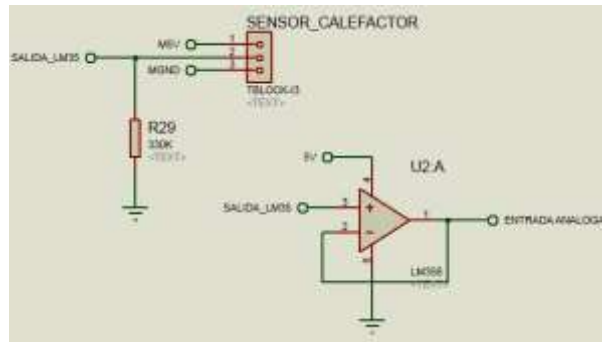


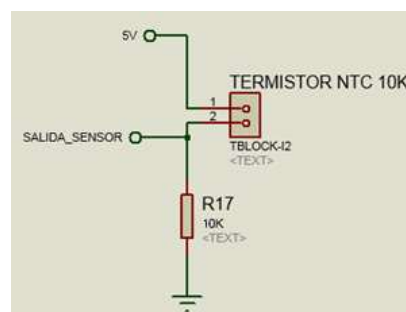
Figura 46 Configuración del sensor del conducto de Calefacción

4.4.1.7. Temperatura corporal del neonato

El sensor usado para censar la temperatura corporal del neonato es el **Termistor NTC 10K encapsulado**, muy eficiente para trabajar en condiciones de humedad con un rango de medición entre -30°C $+120^{\circ}\text{C}$ y una exactitud de 0.1°C , aunque no es recomendable exceder los 100°C . El funcionamiento del Termistor NTC va de mayor temperatura, menor resistencia y con ello, mayor flujo de corriente eléctrica por lo que se realiza un divisor de tensión con una resistencia de 10k como se puede apreciar en la Figura 47 (Ver anexo 6).



(a)



(b)

Figura 47 a) Termistor NTC 10K b) Configuración sensor corporal

Se elige una resistencia de 10K para ponerlo en serie con el termistor, porque su valor de 10k alcanzara en un entorno de 25°C, ya que este valor entra dentro de la escala habitual de medición de este tipo de NTC, lo que se intenta es linealizar el sensor como se aprecia en la Figura 48 obtenida del datashet del termistor.

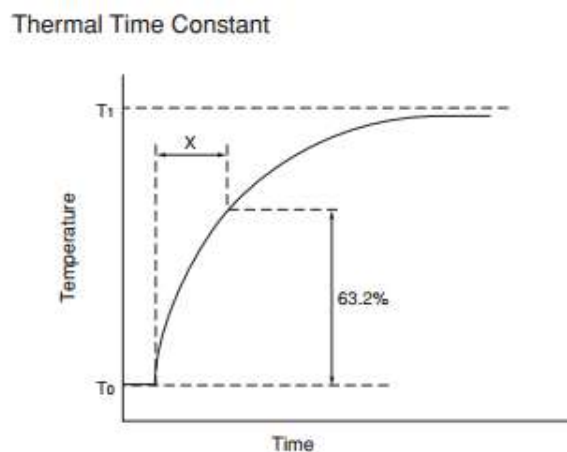


Figura 48 Curva ante el aumento de temperatura Termistor NTC

Un termistor NTC no tiene un comportamiento lineal, por lo que una variación en la resistencia puede significar un cambio brusco de temperatura mayor o menor, por lo que se recolecto 3 mediciones de temperatura y resistencia, una medida en el medio de la escala y dos medidas, ambas en los extremos como se aprecia en la Tabla 20.

Tabla 20
Valores obtenidos del sensor

R(Ω)	T($^{\circ}$ C)
44120	-10
8160	30
2135	70

Estos valores obtenidos en las mediciones correspondientes, se ingresan en una calculadora ubicada en una página web libre del sensor NTC (Inc, 2015), la cual

ayudará a obtener los parámetros deseados para la ecuación, el cual facilitará la transformación de tensión a grados Celsius, con una mayor exactitud en la lectura.

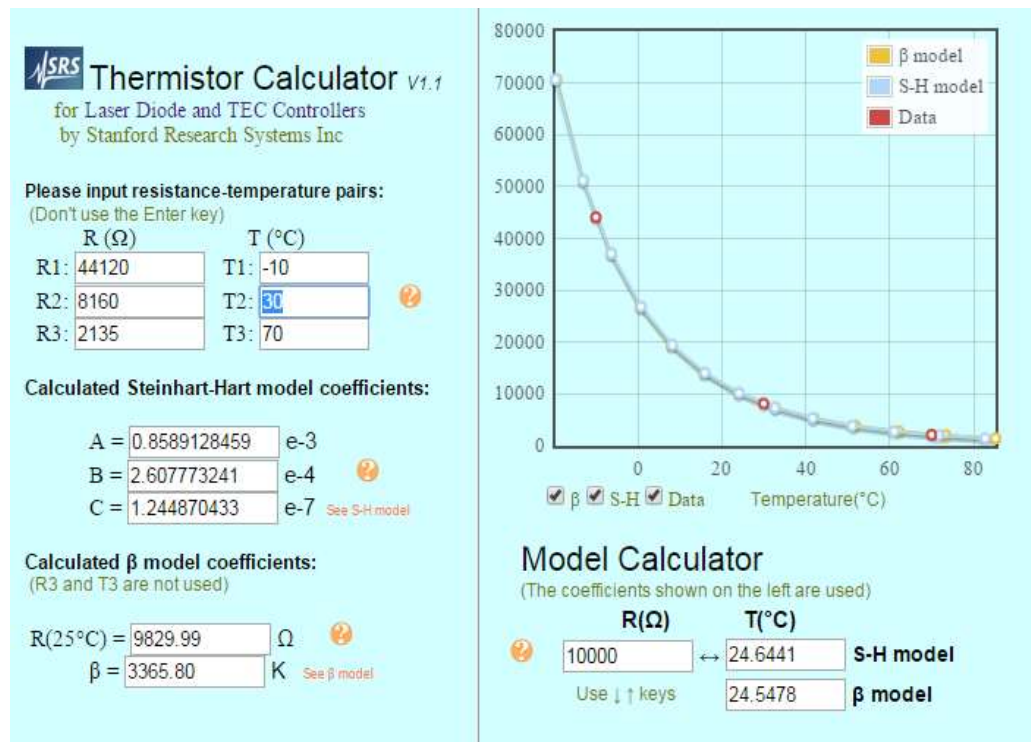


Figura 49 Calculadora para los coeficientes de la ecuación

Fuente: (Inc, 2015)

4.5. Diseño del Sistema de Control del prototipo

En esta apartado se indicará como se realizó el modelamiento de la planta y la obtención de los parámetros de control PID. En este trabajo se implementó 3 modos de operación con dos modos de ingreso manual por el tablero de control y son modo de reposo, modo automático y modo servo controlado.

En la Figura 50 se muestra el modo de operación en reposo de la incubadora neonatal que basa su funcionamiento en una variable previamente configurada por el administrador y que el sistema a través de la lectura del sensor corporal va a controlar. El objetivo de este modo es brindar seguridad al neonato ya que al momento de encender la incubadora, este modo actuara directamente calentando el área donde se

encuentra el neonato previniendo el descuido del administrador si fuera este el caso y deje sin configurar la temperatura.

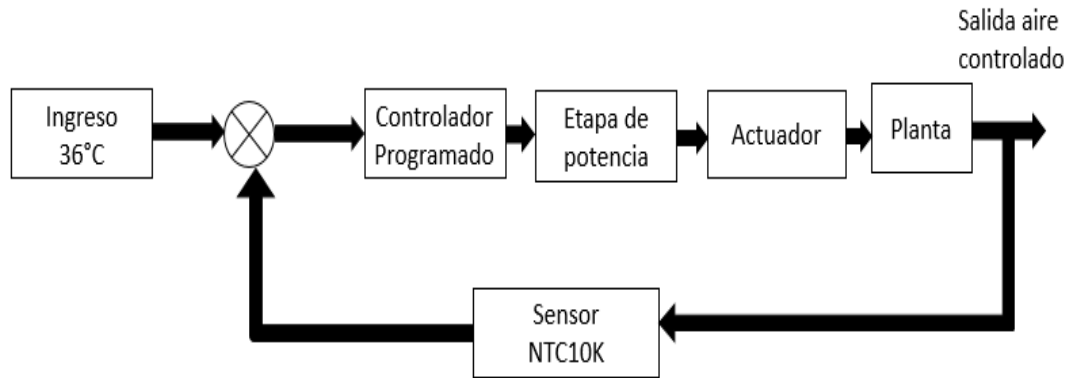


Figura 50 Sistema de control en Modo Directo

La Figura 51 muestra el modo de operación automático, en el cual el operador de la incubadora deberá ingresar el parámetro de temperatura deseada, en este modo la relación de control se lo realiza tomando como referencia la lectura del sensor ambiental LM35. El objetivo de este modo es mantener configurada una temperatura que necesite él bebe según el criterio del doctor que este atendiendo al paciente tomando como referencia el ambiente que rodea al neonato.

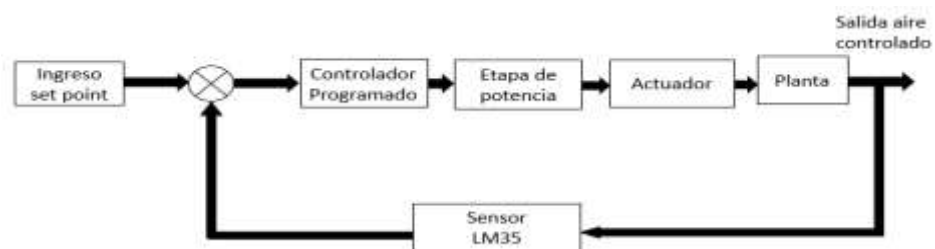


Figura 51 Sistema de control en Modo Automático.

Por ultimo en la Figura 52 se muestra el sistema de control en modo servo controlado que al igual que el modo automático el operador deberá ingresar la temperatura deseada, la diferencia es que este modo toma como referencia la lectura del sensor corporal NTC10K. El objetivo de este modo es mantener configurada una temperatura que necesite él bebe según el criterio del doctor que este atendiendo al paciente tomando como referencia temperatura corporal del individuo.

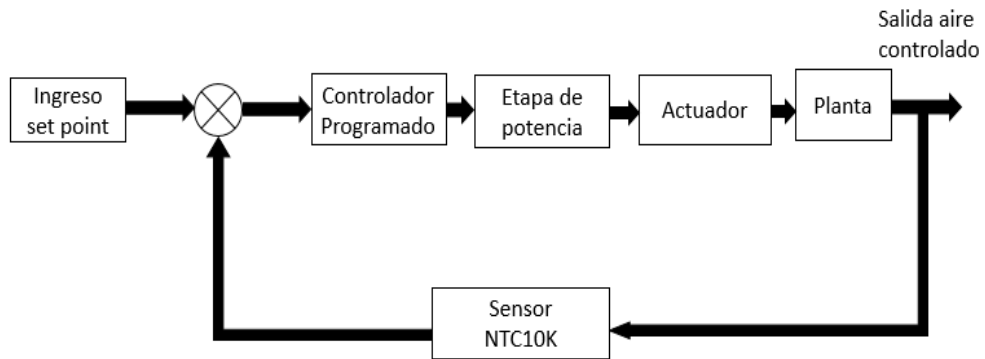


Figura 52 Sistema de control en Modo Servo Controlado.

4.5.1. Modelamiento de la planta

Para obtener la función de transferencia del sistema, se aplicara una señal de entrada tipo rampa con el objetivo de determinar la respuesta transitoria y de estado estable de la misma. Se aplicara un voltaje de alimentación directo a la niquelina y mediante un multímetro digital se medirá la temperatura durante un periodo de 12 minutos, estos datos permitirán ver el comportamiento que tiene el elemento calefactor. La Figura 53 muestra el proceso realizado en bloques:

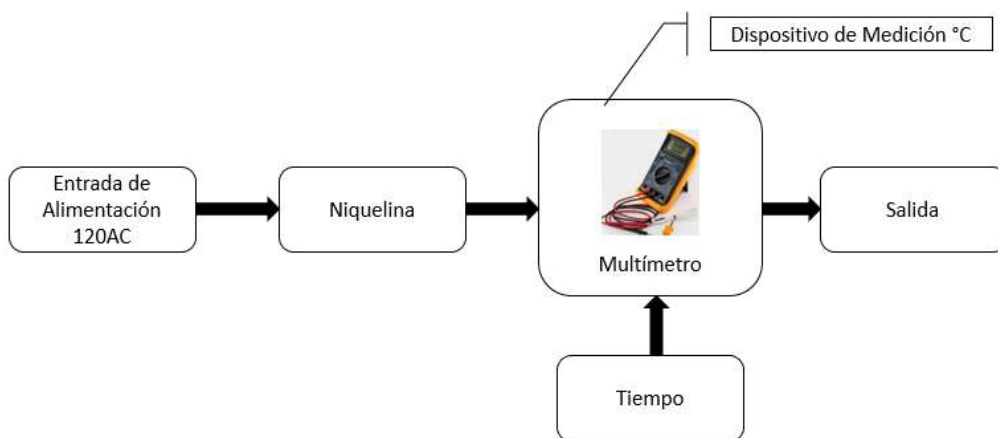


Figura 53 proceso para la obtención de los datos

Se usó el método de aproximación por su simpleza, En la Tabla 16 se observan los datos obtenidos en un intervalo de 20s a 800s.

Tabla 21
Valores de Temperatura vs Tiempo

Tiempo (s)	Temperatura (°C)
20	3
25	4,1
50	5,2
75	8,2
100	9,5
125	10,2
150	13,1
175	14,3
200	15,1
225	16,2
250	16,8
275	18,1
300	18,6
325	19,5
350	19,9
375	20,4
400	20,8
425	21,2
450	22,1
475	23,7
500	24,3

Continua 

525	25,8
550	26,1
575	27,6
600	28,7
625	29,1
650	29,7
675	30,1
700	30,2

Una vez obtenido los datos requeridos mediante el método de aproximación se ingresa las variables de temperatura y tiempo en Matlab 2010. Lo siguiente es obtener una ecuación exponencial teniendo en cuenta que se simula una entrada de tipo escalón y que el sistema que estamos controlando no es completamente lineal (El anexo 8 contiene una explicación detallada de la obtención de esta ecuación paso a paso)

$$y(t) = 13.68e^{0.001182(t)} - 13e^{-0.00831(t)}$$

La Figura 54 muestra el resultado de la ecuación exponencial en la que se puede ver como la señal tiende a ser lineal en función del tiempo en un periodo de 700s con un máximo de temperatura de 30°C.

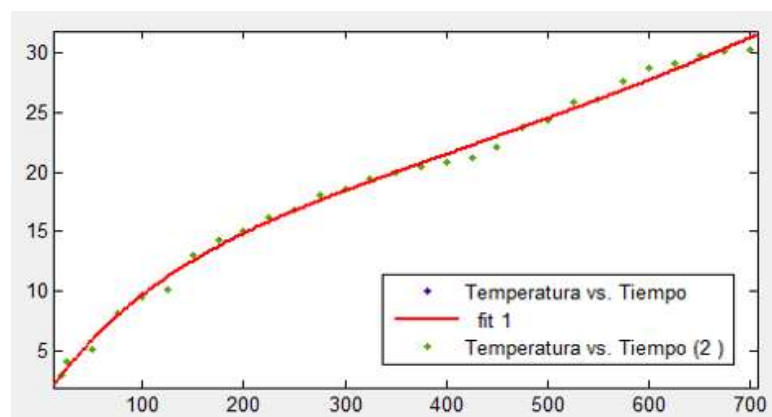


Figura 54 Obtención de la señal exponencial

Con esta ecuación utilizamos la transformada de Laplace por que trabajaremos en el plano S:

$$L\{y(t)\} = Y(S) = L\{13.68e^{0.001182(t)} - 13e^{-0.00831(t)}\}$$

$$G(S) = \frac{0.68s + 0.1291}{s^2 + 0.00728s - 9.82242 \times 10^{-6}}$$

Utilizando la herramienta de Matlab se obtendrá la función de transferencia en lazo cerrado del sistema, tomando una retroalimentación unitaria (Ver anexo 8).

$$G(s) = \frac{0.68s + 0.1291}{s^2 + 0.6873s + 0.1291}$$

La Figura 55 muestra el resultado final de la obtención de la función de transferencia de la planta con la ayuda de Matlab 2010. En la gráfica se observa una señal que tiene un comportamiento constante y se estabiliza en 3500 segundos, requisitos básicos para aplicar el método de sintonización por curva de reacción de ZIEGLER – NICHOLS (ver capítulo 2). La planta tiene un comportamiento exponencial el cual se estabiliza en un tiempo de 3500 segundos, esto se debe corregir. El sistema de control ayudara a reducir el tiempo en el que la temperatura dentro de la incubadora neonatal se estabilice.

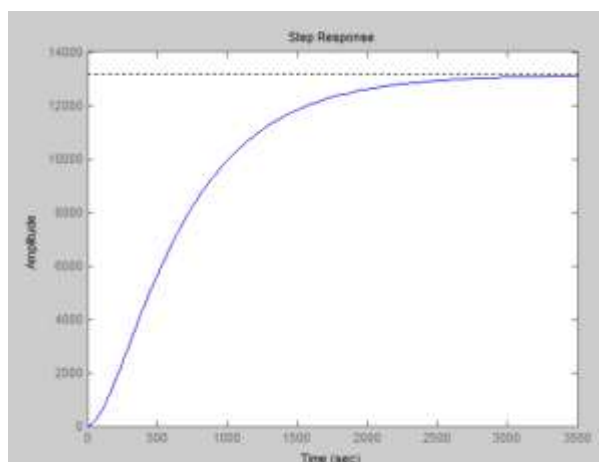


Figura 55 Función de transferencia de la Planta

4.5.2. Control PID de temperatura para los modos de operación

El sistema se realizara a través de tres acciones, el control proporcional reducirá la señal del error de estado estacionario, el control integral proporcionara una corrección para mantener la variable controlada mediante el setpoint y por último el control derivativo estabilizara con mayor rapidez, la variable a controlar luego de cualquier error, esto se puede revisar en el capítulo 2 más a detalle.

El objetivo de utilizar los parámetros de un control PID, es que con la ayuda de la tarjeta Arduino se pueda ingresar estos valores para controlar el ingreso del aire caliente hacia el interior de la incubadora neonatal, esto se puede apreciar más a detalle en la Figura 56.

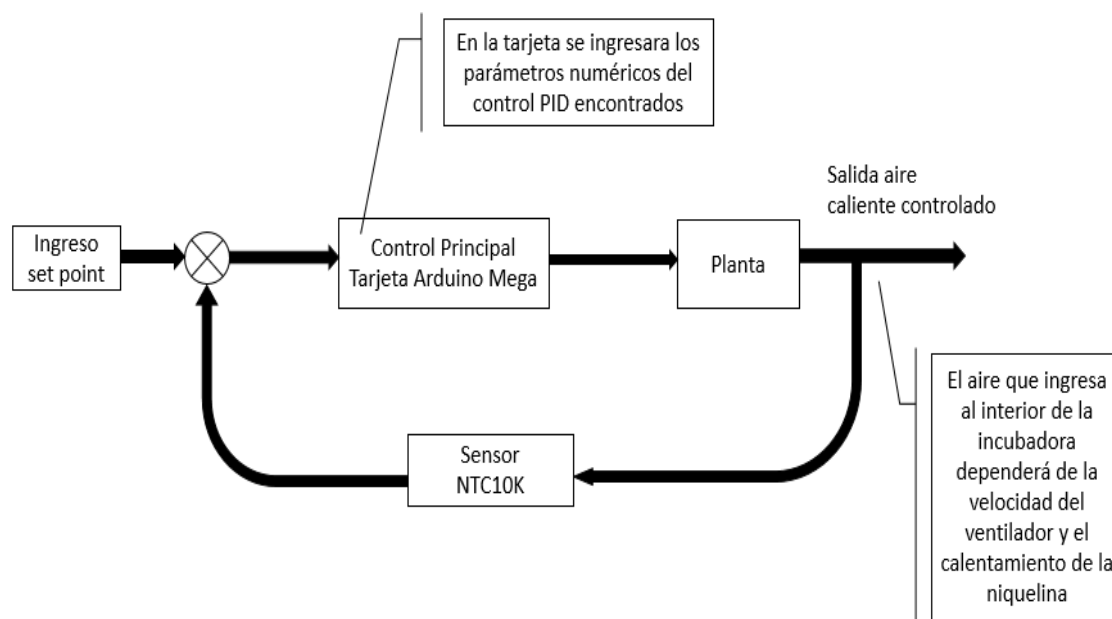


Figura 56 Sistema de control PID de la Incubadora Neonatal NPI

El prototipo de incubadora permite controlar la temperatura dentro del área donde se encuentra ubicado el neonato, el control PID actúa tomando como referencia la lectura del sensor de temperatura ambiental a través del LM35 que envía una señal hacia la tarjeta Arduino Mega y también se realiza el mismo control PID tomando

como referencia el sensor corporal NTC10K que de la misma forma envía la señal hacia la tarjeta.

La niquelina funciona al 100% de su capacidad, enviando calefacción por los conductos mediante un ventilador ubicado en el mismo orificio, los tiempos de control entre grados de temperatura son lentos y así se evita los sobresaltos que se puedan dar al elevarse la temperatura.

La variable de control del PID controlará la velocidad del ventilador helicoidal, el funcionamiento del ventilador será, enviar aire que ingresara por los conductos de ventilación hacia el interior de la incubadora neonatal. El control de la niquelina será activado por un relé y la variable de control tendrá correlación con la temperatura de la incubadora neonatal, el control de la niquelina será ON/OFF.

4.5.2.1. Determinar los valores de K_p , K_i y K_d

Para poder sintonizar el PID se utilizó el método de ZIEGLER – NICHOLS (Ver detalles en el capítulo 2). Este método requiere conocer la función de transferencia de la planta tal como se observa en la Figura 57. El presente método necesitamos encontrar los parámetros de tiempo de retardo (L) y la constante de tiempo (T), por lo que se dibujara un punto de inflexión en la curva. Los comandos y los pasos a seguir para la obtención de la siguiente grafica se encuentran en el Anexo 8.

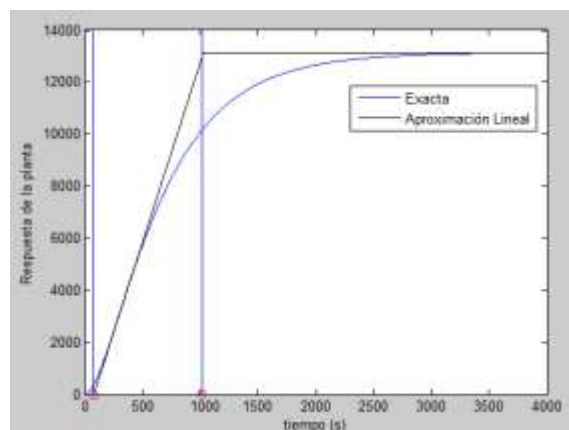


Figura 57 Recta Tangente al punto de inflexión.

Los valores obtenidos del tiempo de retardo L y la constante de tiempo T son 78.6914 y 946.0348 respectivamente.

```
>> L
L =
    78.6914
>> Tao
Tao =
    946.0348
```

Para determinar los valores de las constantes del PID, se utilizó los parámetros propuestos por ZIEGLER-NICHOLS (ver Tabla 18). De acuerdo a las ecuaciones de la tabla 18 los valores de las constantes del controlador PID quedan de la siguiente forma:

$$K_p = \frac{1.2 * T}{L} \quad T_i = 2 * L \quad T_d = 0.5 * L$$

Reemplazando los valores obtenidos en los apartados anteriores se obtuvo los parámetros siguientes:

$$K_p = 14.4265 \quad T_i = 157.3828 \quad T_d = 39.3457$$

En la Tabla 22 se puede observar la tabla de ZN con los valores calculados.

Tabla 22
Valores calculados por el método de ZN

	K_p	T_i	T_d
P	12.0220		
PI	10.8198	236.0742	
PID	14.4265	157.3828	39.3457

Para encontrar la función del controlador PID usamos la siguiente ecuación:

$$G_c(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd * s$$

De donde podremos obtener los valores de las constantes Kp, Kd y Ki, para expresar la función de PID.

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} = 0.09166 \qquad Kd = kp * Td = 567.62$$

$$G_c(s) = \frac{567.62s^2 + 14.4265s + 0.09166}{s}$$

Finalmente obtenemos la función de lazo cerrado que involucra el control PID y la función de la planta con retroalimentación.

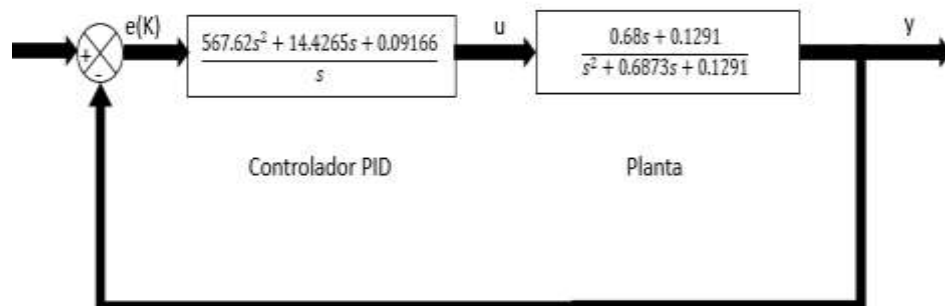


Figura 58 Diagrama en bloques del sistema con un control PID implementado

Por último se comprobó la respuesta de la planta simulando en Matlab 2010.

```
>> G=tf([567.62 14.4265 0.09166],[0 1 0])
```

```
Transfer function:
```

```
567.6 s^2 + 14.43 s + 0.09166
```

```
-----
```

```
s
```

```

>> hlc=feedback(G*H1,1)

Transfer function:
386 s^3 + 83.06 s^2 + 1.924 s + 0.01183
-----
387 s^3 + 83.07 s^2 + 1.924 s + 0.01183
|
>> step(hlc)

```

Obteniendo como resultado un control que se estabiliza en los 100 primeros segundos de acuerdo a la Figura 59. Con un sobre pico del 10%, un tiempo de subida de 125 segundos en el que se estabiliza la planta.

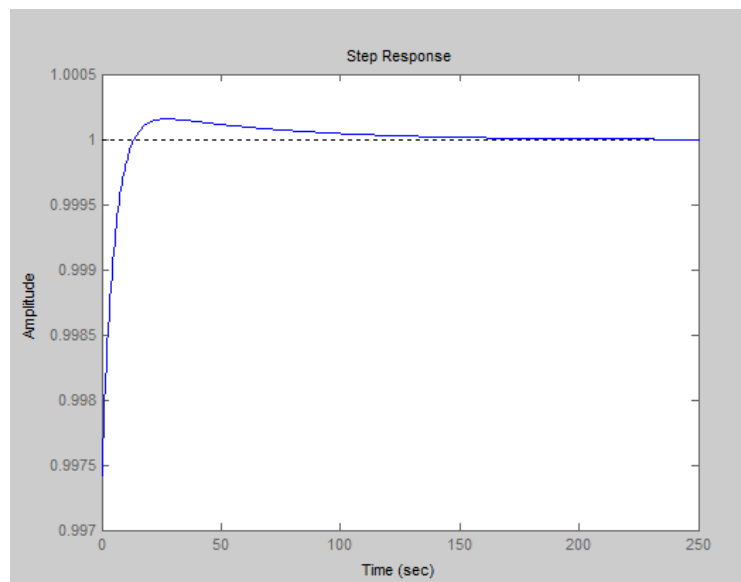


Figura 59 Curva de respuesta en lazo cerrado de la planta.

La Tabla 23 muestra los datos obtenidos en las gráficas de las funciones de transferencia tanto de la planta como la del sistema actuando el controlador PID. Los datos expresados en la tabla indican una disminución en el tiempo de control para alcanzar la temperatura deseada, además podemos apreciar como el sistema actúa en lazo cerrado disminuyendo las perturbaciones y estabilizando la planta con mayor rapidez.

Tabla 23
Datos obtenidos de las Funciones de transferencias

	Planta	Planta + Control
$t_d(seg)$	500	5
$t_r(seg)$	1000	10
$t_p(seg)$	3500	25
$M_p(\%)$	-----	10
$t_s(seg)$	3500	125

Una vez determinado los valores de las constantes KP, KI Y KD, se implementará estos datos en la librería de Arduino PID_v1.h que basa su funcionamiento en un controlador PID (Ver anexo 9) en el que cambiaremos los valores por defecto, por los calculados.

```
double consKp=14.42, consKi=0.09166, consKd=567.62;

myPID.SetTunings(consKp, consKi, consKd);
```

La Figura 60 muestra la tarjeta Arduino Mega en fase de prueba, en la que se implementó el controlador PID para realizar pruebas de funcionamiento antes de aplicarlo a la incubadora neonatal, donde se ve en los display la lectura de los sensores de piel y temperatura, el LCD SHIELD

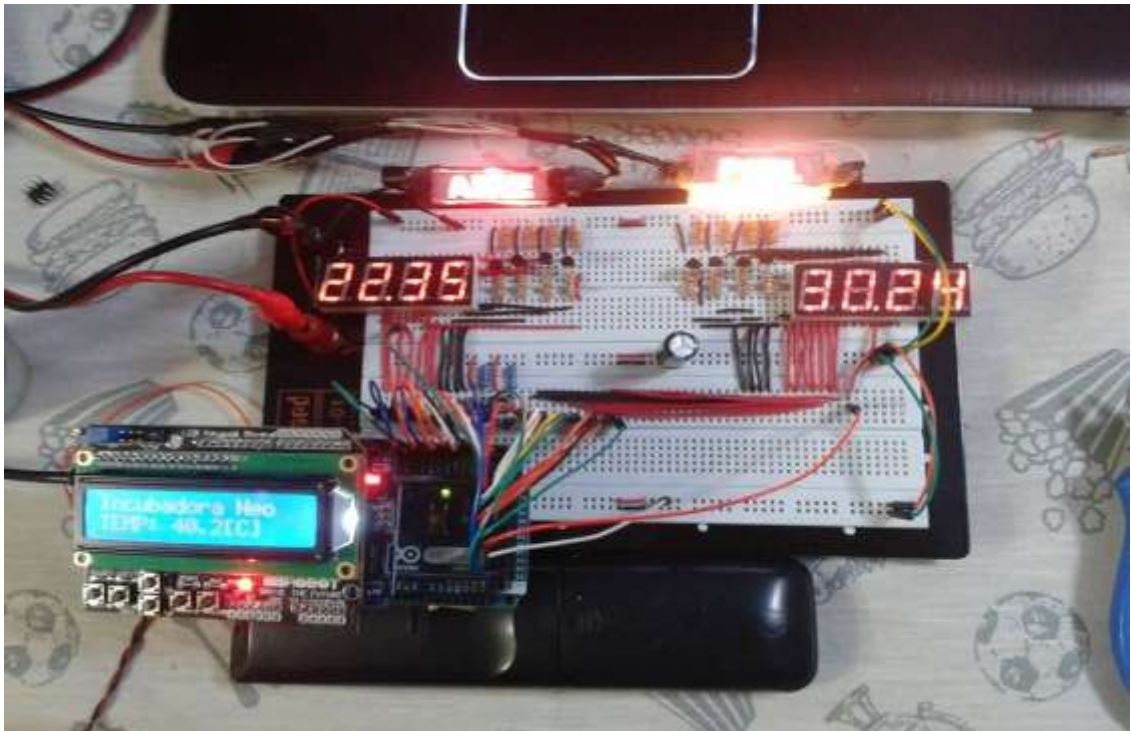


Figura 60 Controlador Implementado en la Tarjeta Arduino Mega

4.5.3. Diagramas de flujo del sistema de control del prototipo

Una vez encontrado los valores de los parámetros del controlador PID y con la ayuda de la librería Arduino PID_v1.h (), se realizara la implementación del código que se ingresara a las tarjetas de control. La librería arduino facilitará el uso del controlador PID ya que permite ingresar los parámetros P, I y D al sistema. Los siguientes diagramas de flujo muestran el funcionamiento del código de ejecución en la tarjeta.

En la Figura 61 se muestra el procedimiento principal del sistema de control, como se observa en el diagrama, este divide en 4 condiciones de operación, 3 modos de control donde intervienen el control PID para controlar el actuador 1 y una 4 condición que solo se ingresara cuando el sistema está funcionando de manera inadecu0ada.

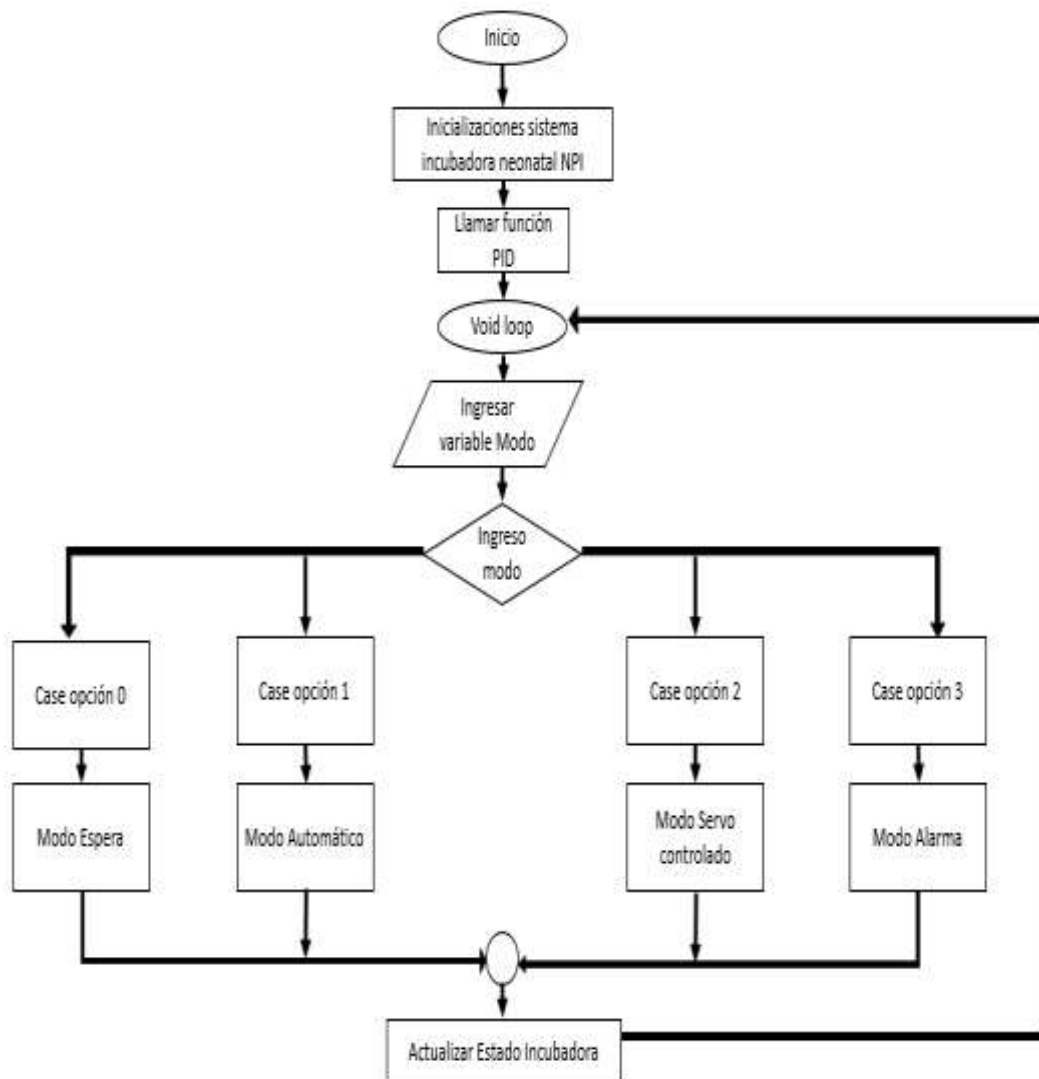


Figura 61 Diagrama de Flujo principal del prototipo

En la Figura 62 se muestra el diagrama de flujo del modo directo del sistema de control, este modo actuara directamente al encenderse el equipo. Su funcionamiento se basa en que por default se ha ingresado una temperatura de 36°C, el sistema tomara esta referencia y comenzara a activarse los actuadores para llegar y estabilizarse en esta temperatura.

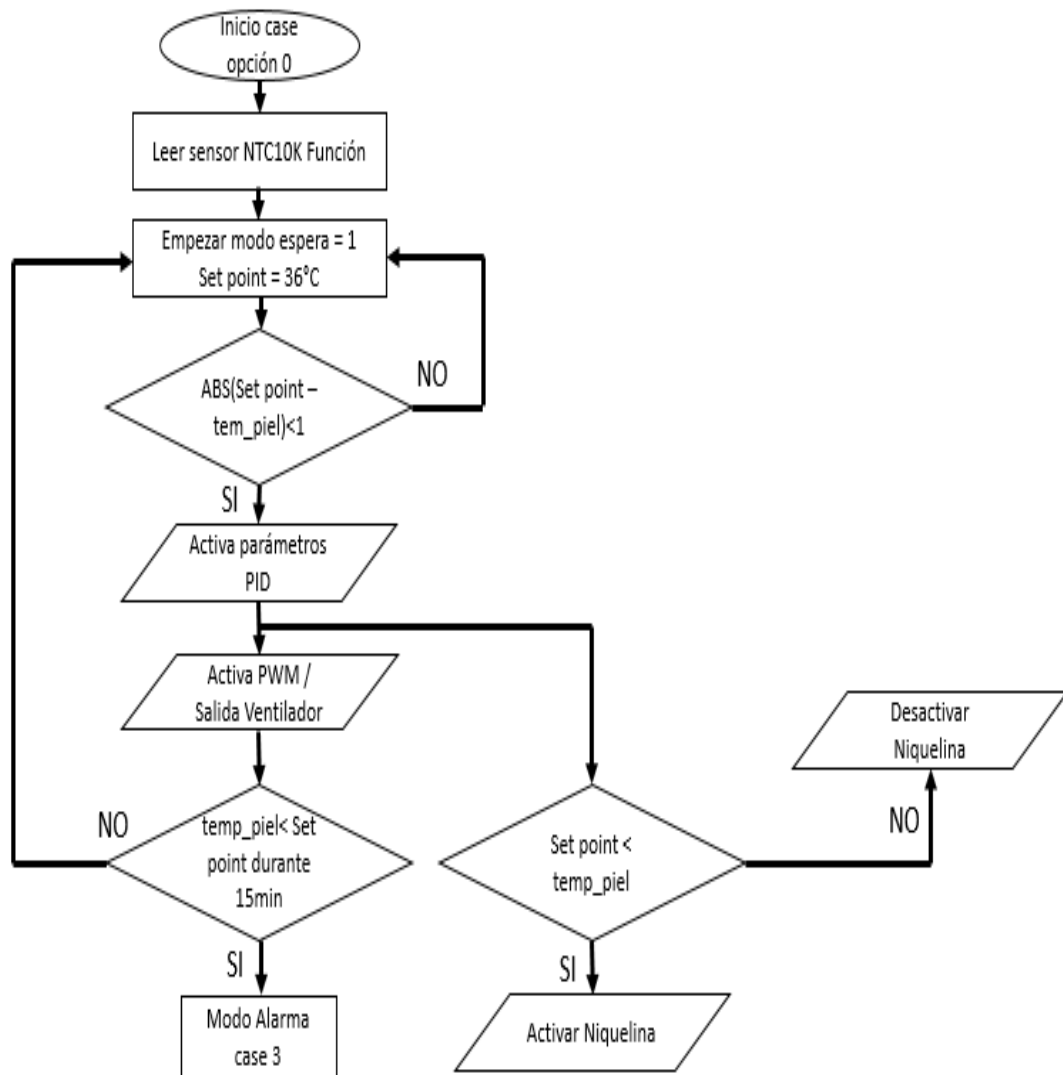


Figura 62 Diagrama de flujo en Modo Directo

El siguiente diagrama representa el modo servo controlado y se lo puede apreciar en la Figura 63, su funcionamiento se basa en que toma como referencia la lectura del sensor corporal y el operador ingresa un set point, con estos valores el usuario tiene la opción de iniciar el proceso de calentamiento pulsando el botón enter del equipo como se ve en el diagrama.

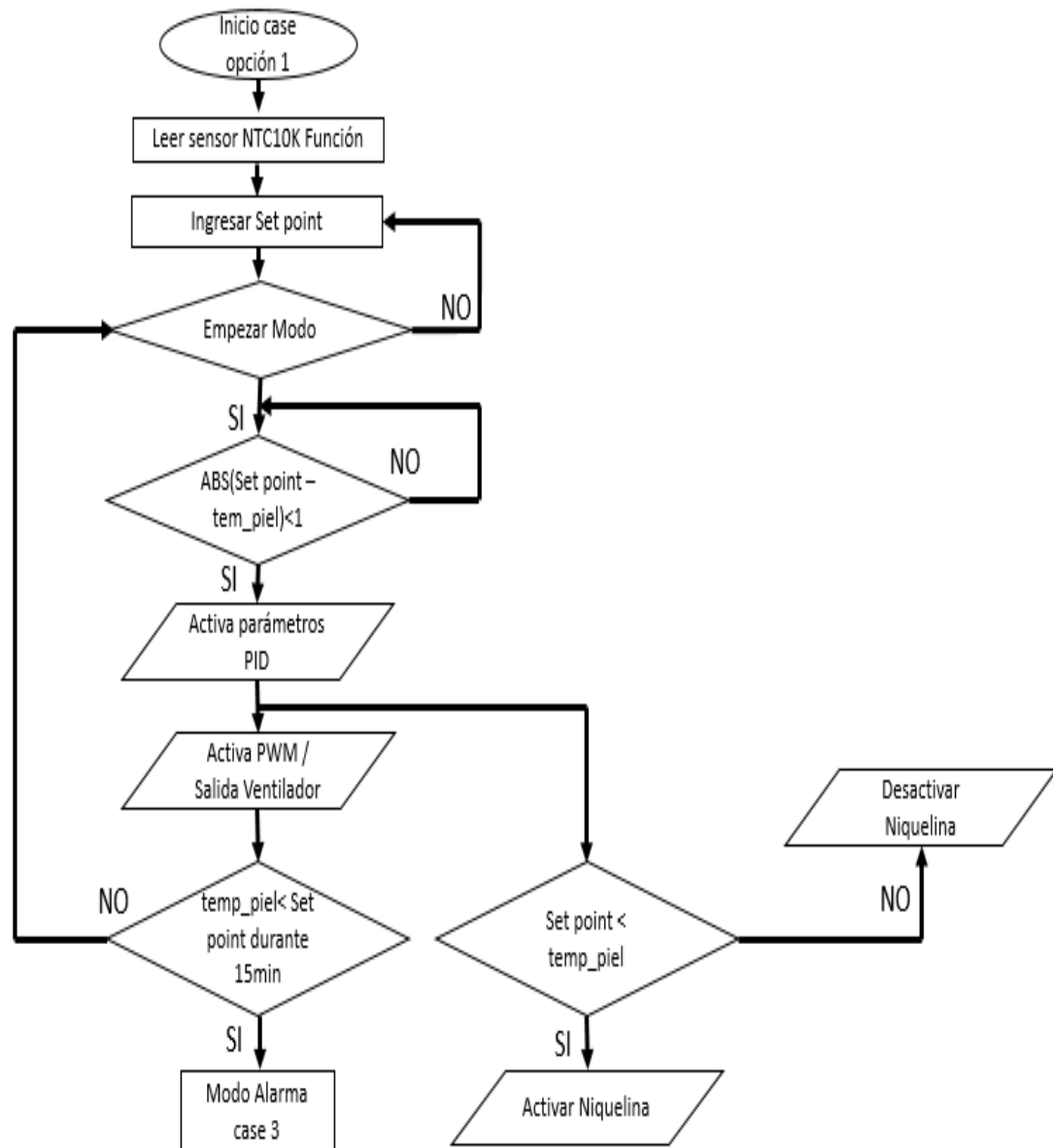


Figura 63 Diagrama de flujo en Modo Servo Controlado

En la Figura 64 se aprecia el modo automático, similar al modo anterior, con la diferencia que la lectura de la temperatura la toma del sensor ambiental LM35, su funcionamiento es el mismo, toma como referencia la lectura del sensor y el valor ingresado por el usuario, y el operador tiene la opción de iniciar el proceso.

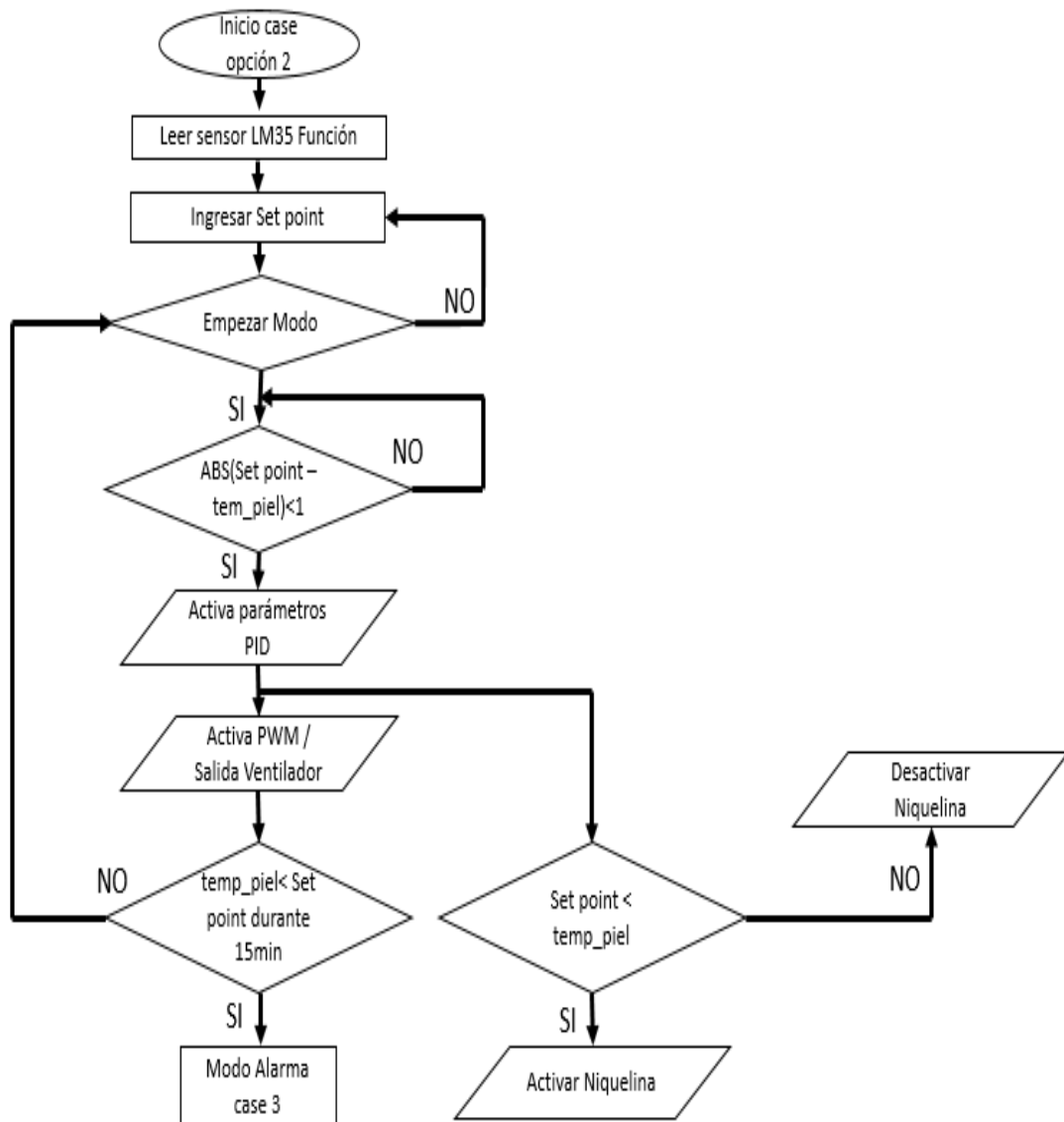


Figura 64 Diagrama de flujo del sistema de control en Modo Automático

En la Figura 65 se puede apreciar el ultimo modo de operación, este modo recaen los anteriores modos ya que este solo se activa cuando el sistema está funcionando inadecuadamente, es decir el valor seteado no es similar con la lectura de cualquiera de los sensores, esto debe sobre pasar los 15 min de operación del sistema.

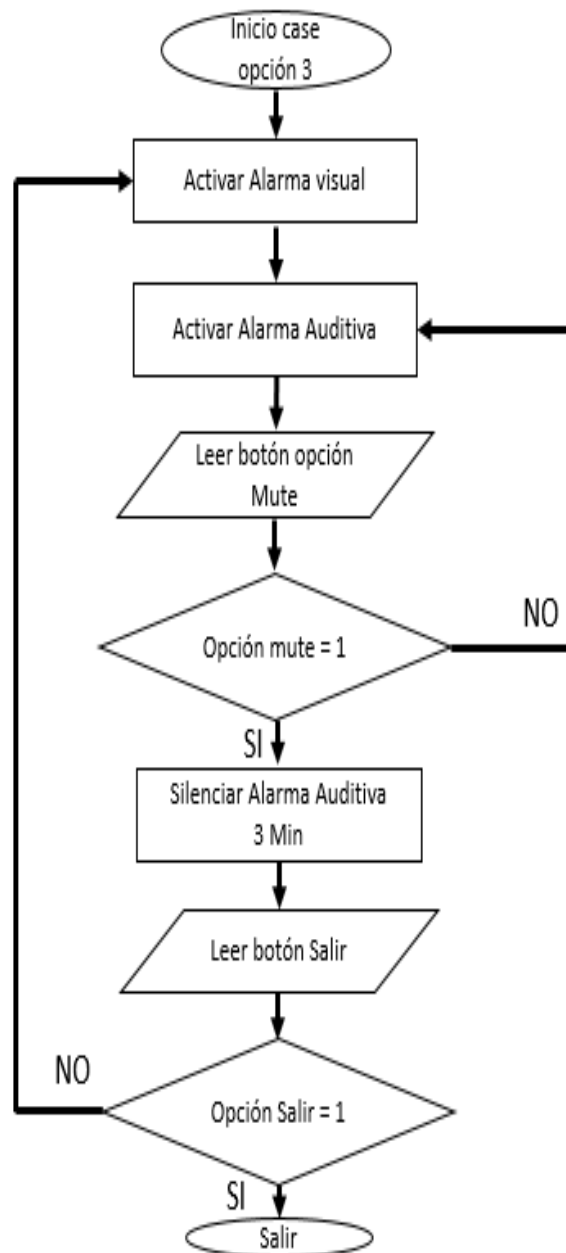


Figura 65 Diagrama de Flujo del sistema de control en Modo Alarma

4.5.4. Diseño de tarjetas de control de la Incubadora Neonatal NPI

Para el diseño de las tarjetas electrónicas se utilizó una herramienta CAD la cual es PROTEUS DESIGN SUITE versión 8.2, se tomó en cuenta la disposición

de los elementos en cada una de las placas y que estos no tuvieran contacto entre sí. La Figura 66 muestra la distribución de los elementos en las tarjetas diseñadas.

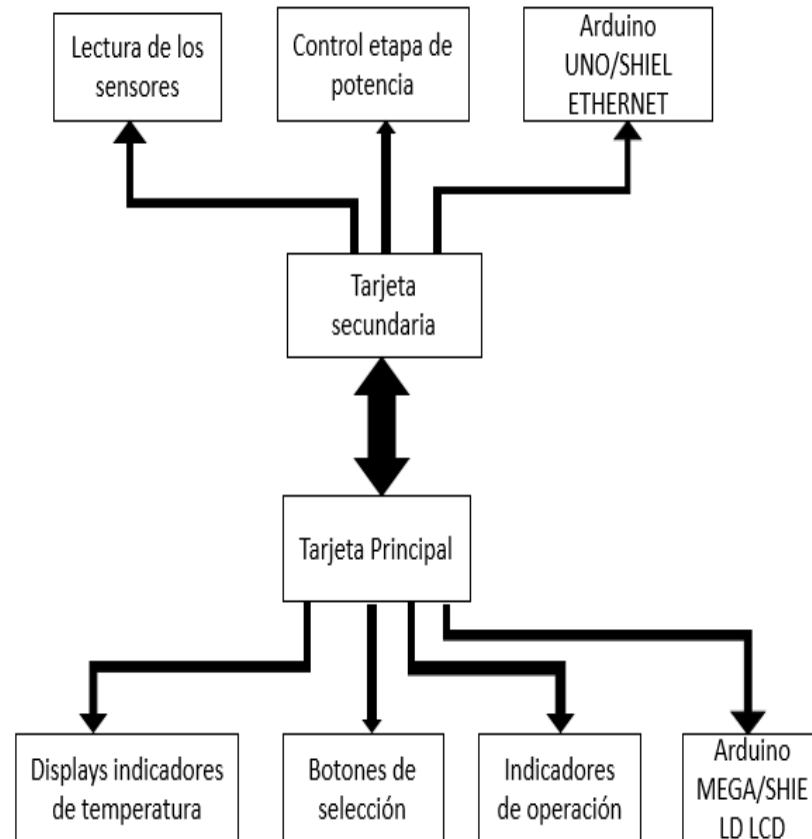


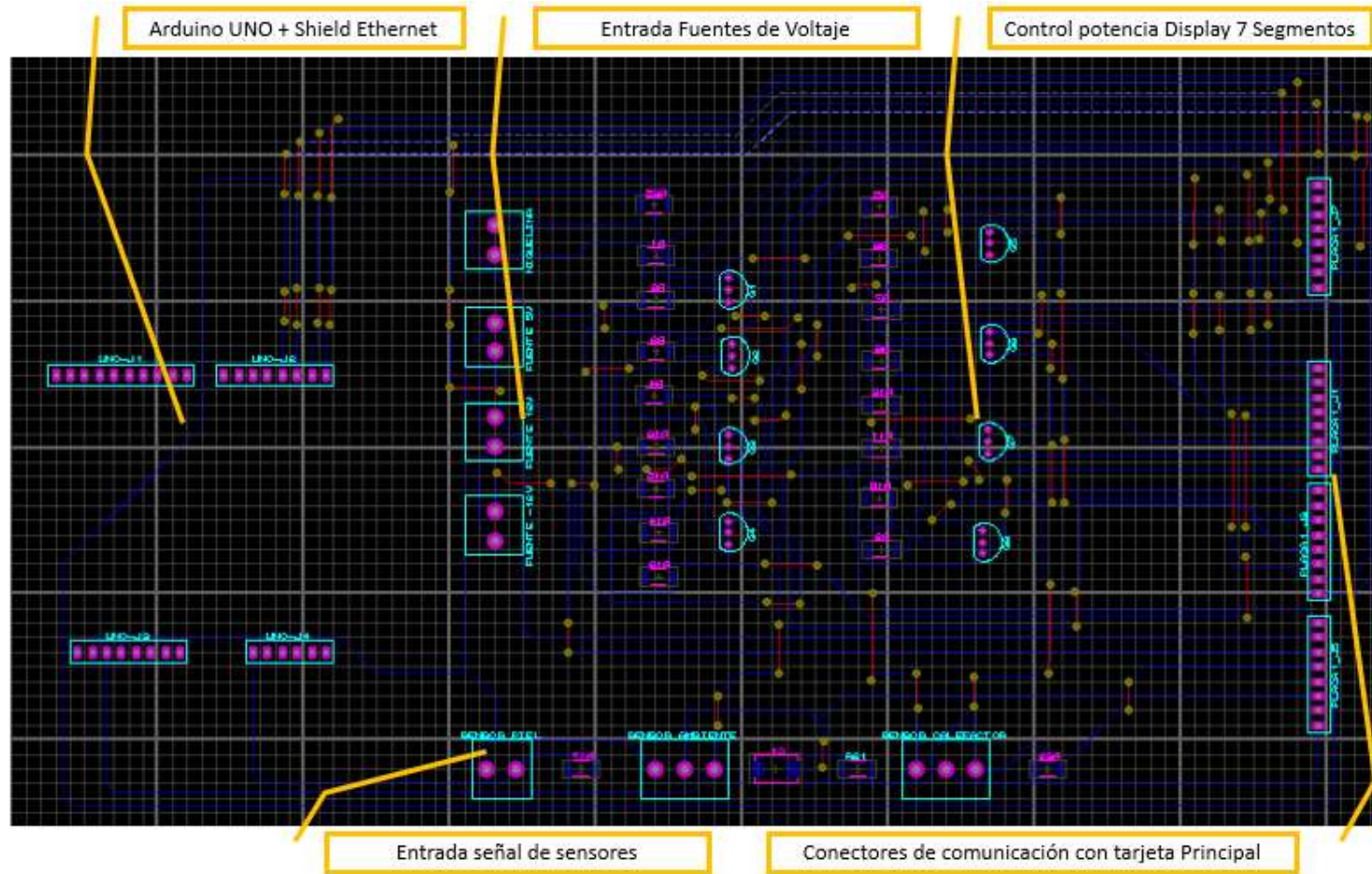
Figura 66 Disposición de los elementos en las tarjetas del prototipo

Los componentes utilizados están colocados paralelamente a los bordes de la placa, tiene una separación de dos pulgadas entre punto de suelda y además se realiza ángulos de 135° cuando se gira en esquinas y cruces. Las líneas tienen un grosor de 2mm por soportar una corriente de 5A aproximadamente, la separación entre pistas es de 0.4mm por el diseño de la placa y por el uso de elementos además de la tensión eléctrica que puede producir si se acercan demasiado. La Figura 67 y Figura 68 muestran las placas principal y secundaria de la Incubadora Neonatal (Los diagramas en Autocad se puede apreciar en el Anexo 10).



(a)

Continua →



(b)

Figura 67 a) Diagrama CAD Principal b) Diagrama CAD Secundario

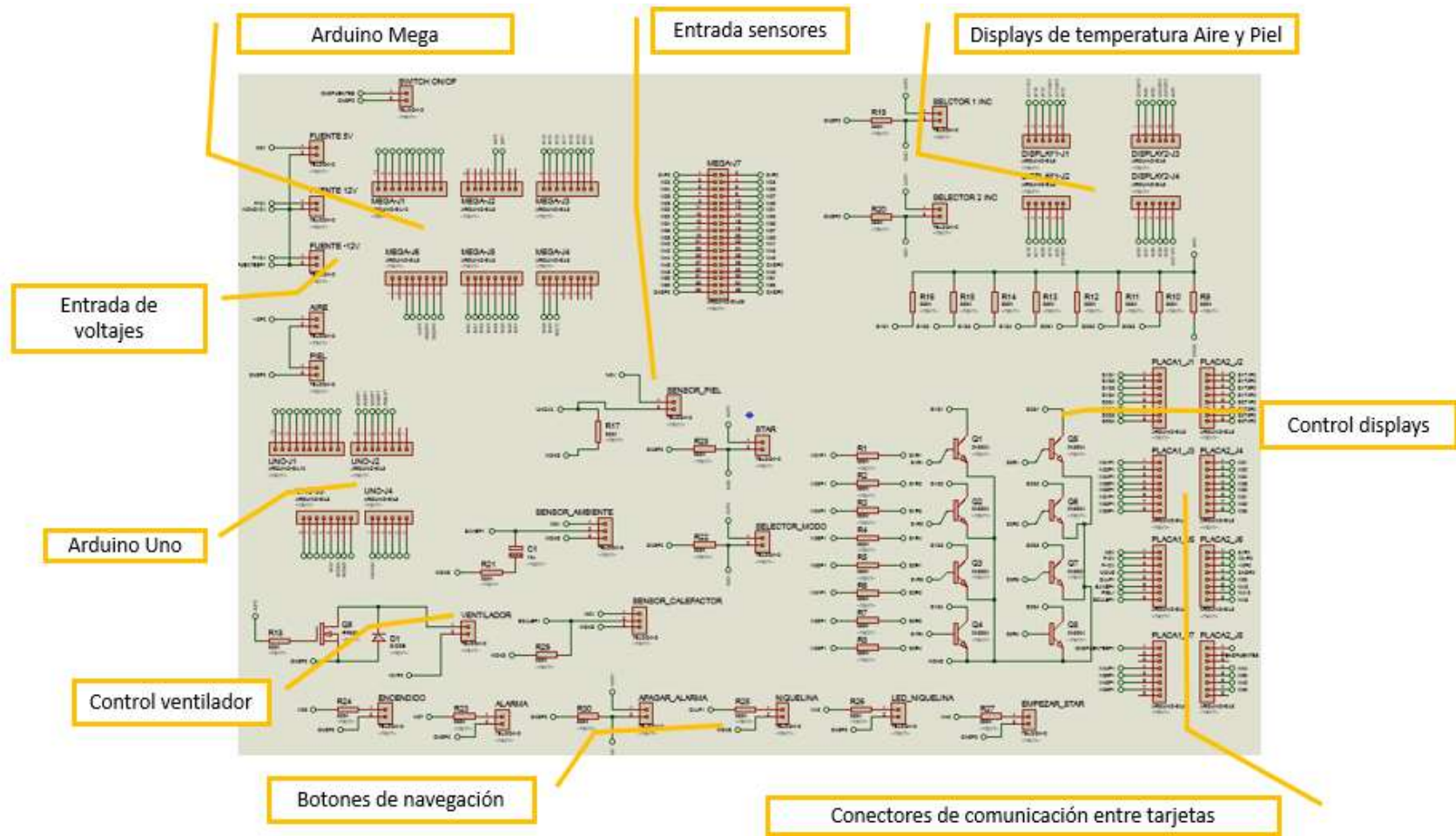


Figura 68 Diagrama CAD de los elementos de las Tarjetas de control

4.5.5. Etapa de Potencia

Para el control de los display indicadores de temperatura se optó dividir la parte de control en una placa secundaria para mejorar el sistema y la disposición de otros elementos, se adicióno borneras de placa para comunicar las placas entre sí, la Figura 69 muestra la disposición de los elementos de control de los displays.

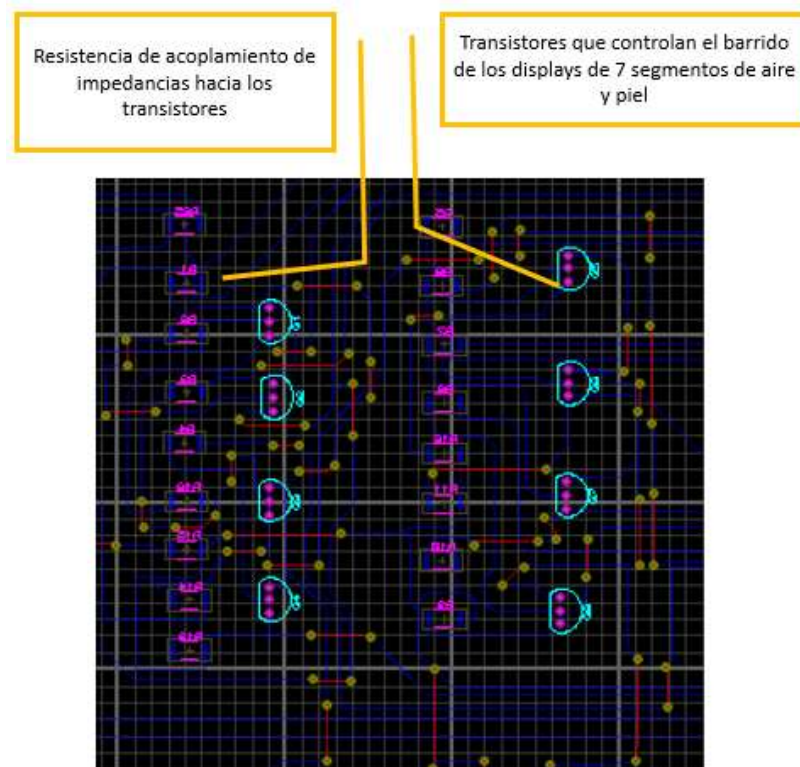


Figura 69 Diseño del control de los Displays en ISIS

Para la conexión de los sensores se usó borneras ubicadas en la placa y cable flexible resistente para que llegue la señal a los micro controladores, estos elementos están alimentados a una fuente de 5v.



Figura 70 Placa de sensores de temperatura en ISIS

Para la entrada del panel de control, indicador de alarma y botones en general, se les ubico en la placa principal ya que estos también tienen una alimentación de 5V.

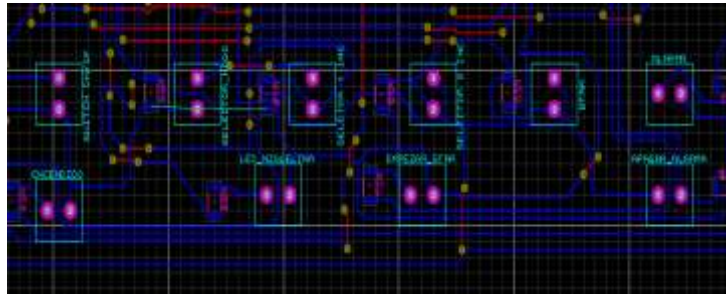


Figura 71 Disposición de los botones de control en ISIS

4.6. Panel Operador – Equipo

El panel del operador es bastante completo, consta de una pantalla LCD que muestra el modo en el que se encuentra en ese momento el equipo, además de permitir visualizar el valor que se está seteando mediante la activación de los pulsadores en la parte frontal. Otra característica del panel es que aparte de tener un LCD, también consta de 8 displays, los cuales muestran la temperatura del neonato y la temperatura ambiental que rodea al bebe. La Figura 72 muestra claramente como está dividida la placa principal lo que realiza durante la operación del equipo.



Figura 72 Disposición del panel de control de la Incubadora.

4.6.1.1. Interfaz HMI para visualización remota

Para la realización de la interfaz HMI remota se utilizó el SHIELD Ethernet de Arduino (Ver capítulo 4, Tarjetas de control Arduinos), Se realizó esta interfaz de comunicación para tener observado al neonato a través de largas distancias, ya que es sumamente importante ver la temperatura corporal del niño en todo momento, cabe recalcar que la interfaz vía web solo sirve para monitoreo y no de control, La Figura 73 muestra un diagrama explicativo de la interfaz de visualización remota.

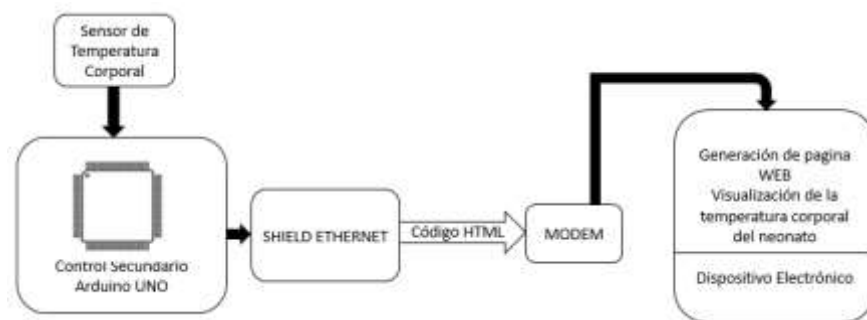


Figura 73 Envío del código HTML para monitoreo remoto

La Figura 74 muestra la interfaz desarrollada y con ayuda de arduino puesta en marcha a través de shield de Ethernet, el código se encuentra en los anexos adjuntos a este proyecto de investigación.



Figura 74 Interfase HMI via una IP estática

CAPÍTULO 5

5. Resultados y Validación del Prototipo

Finalmente en este capítulo se realizara el análisis del funcionamiento del prototipo de la incubadora neonatal siguiendo la norma UNE-EN 60601-2-19; la cual es un requisito para que el equipo pueda operar correctamente. Además se desarrollara un manual de usuario para el operador del equipo.

5.1. Análisis de funcionamiento del Prototipo

Los datos expuestos en la Tabla 24 fueron recolectados durante un proceso de configuración por el usuario. Los valores que fueron ingresados en el panel de control variaron entre 30 °C a 38°C con incrementos de 1 °C. Las medidas que se encuentran en la tabla son del sensor de ambiente, el sensor corporal, y de un multímetro digital como instrumento de referencia.

Tabla 24
Valores de temperatura obtenidos en un rango de 30°C a 38°C

Ingreso por Usuario (°C)	LM35 (°C)	NTC (°C)	Termómetro Digital (°C)
31	30.6	31.5	30.8
32	31.7	32.4	32.3
33	32.3	33.6	32.8
34	33.6	34.3	33.5
35	34.1	35.6	34.8
36	35.5	35.9	35.9
37	36.8	36.8	37.2
38	37.1	38.1	38.4

Tal como se observa en la Tabla 25 el error de cada medida varía entre 0.1°C a 1°C. Estas medidas están dentro de lo permitido según lo que estipula la normativa UNE-EN 60601-2-19. El funcionamiento de la incubadora neonatal se basa en mantener un rango de temperatura que va desde 32°C hasta los 36° sin sobrepasar esta temperatura ni reducirse durante el funcionamiento del equipo. Por lo que se puede demostrar que el funcionamiento del prototipo de incubadora cumple con la normativa y el resultado esperado es satisfactorio.

Además la normativa menciona que para que un equipo trabaje correctamente con respecto a la diferencia entre el sensor de temperatura ambiente LM35 y el sensor de temperatura corporal NTC debe ser menor a 1.5°C para lo cual se analizará cada una de estas medidas por separado tal como se observa en la Tabla 20 y 21.

Para comprobar la exactitud de nuestro prototipo, se calculan los errores absolutos y relativos, tomando como valor de referencia el estipulado por el operador, se aplica las siguientes ecuaciones para la obtención de estos porcentajes:

$$ErrorA = ABS(Valor medido - Valor Verdadero)$$

$$ErrorR = \frac{ErrorA}{Valor medido} \times 100$$

Una vez calculada la media del error relativo se procedió a calcular la desviación estándar mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Tabla 25
Diferencia de temperatura según la normativa UNE-EN 60601-2-19

LM35 (°C)	NTC (°C)	Diferencia de Temperatura (°C)
30,6	31,5	0,9
31,7	32,4	0,7
32,3	33,6	1,3
33,6	34,3	0,7
34,1	35,6	1,5
35,5	35,9	0,4
36,8	36,8	0
37,1	38,1	1

En la Tabla 26 se puede observar el error absoluto y relativo del sensor LM355, donde se observa que se obtuvo un error relativo de $1.5\% \pm 0.7\%$. Al comparar este resultado con la normativa UNE-EN 60601-2-19 se puede observar que el error es más grande de lo establecido. Esto se estima que es debido a un sobrecalentamiento de la niquelina en el momento de acercarse al valor configurado por el operador. Esto permite identificar el problema de funcionamiento mínimo que se puede corregir para futuras mejoras en el diseño de la incubadora

Tabla 26
Error Absoluto y relativo del Sistema frente al sensor LM35

Ingreso por Usuario (°C)	LM35 (°C)	Error Absoluto (ErrorA)	Error Relativo (ErrorR%)
31	30,6	0,4	1,31
32	31,7	0,3	0,95
33	32,3	0,7	2,17
34	33,6	0,4	1,19
35	34,1	0,9	2,64
36	35,5	0,5	1,41
37	36,8	0,2	0,54
38	37,1	0,9	2,43
Media error relativo			1,58

Obteniendo así una desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{0.56} = 0.748$$

Como se observa en la Tabla 26 el sistema presenta un error medio del 1% $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ frente a la temperatura de referencia. Tomando en cuenta que la normativa específica que el rango de temperatura debe variar entre $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ de la temperatura deseada, y comparando estos valores con los de la Tabla 25, se considera que este sistema cumple con el requisito de la Norma UNE-EN 60601-2-19.

Tabla 27
Error Absoluto y relativo del Sistema frente al sensor NTC

Ingreso por Usuario ($^{\circ}\text{C}$)	NTC ($^{\circ}\text{C}$)	Error Absoluto (ErrorA)	Error Relativo (ErrorR%)
31	31,5	0,5	1,6
32	32,4	0,4	1,2
33	33,6	0,6	1,8
34	34,3	0,3	0,9
35	35,6	0,6	1,7
36	35,9	0,1	0,3
37	36,8	0,2	0,5
38	38,1	0,1	0,3
Media error relativo			1,0

Claramente se identifica en la Tabla 27 que el sensor NTC10K tiene un porcentaje de error mínimo comparado con las lecturas del sensor LM35, esto se debe a que este sensor tiene mejores características de funcionamiento y recepción de temperatura por el hecho mismo del material que está fabricado, (las características de los sensores se pueden observar en el Capítulo 2).

Para reducir el error de lectura de los sensores y mejorar a su vez el control de temperatura de la incubadora neonatal se recomienda para futuras mejoras del equipo la implementación de sensores en cada esquina de la cubierta y un sensor central para

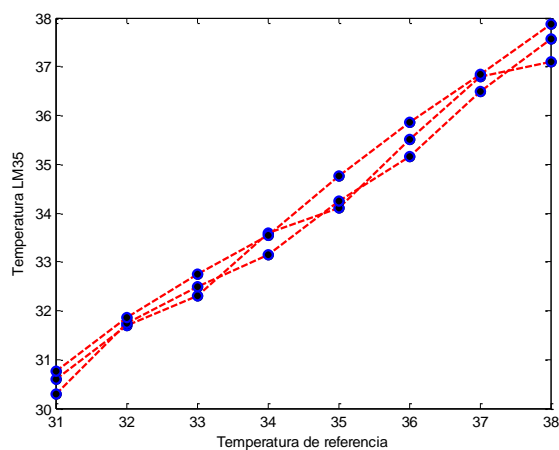
realizar varias medidas y sacar la media, así se obtendrá una medida acertada y se reducirá el error pequeño que ya existe.

Las tablas analizadas en este apartado mostraron datos obtenidos de los sensores de temperatura que fueron comparados con aparatos de medición como multímetros y referenciándolos con valores configurados por el operador, permitieron verificar el funcionamiento de la incubadora neonatal NPI, tanto del sistema de control implementado como el diseño y construcción de la incubadora, acoplamiento de actuadores y demás.

5.2. Análisis de la respuesta del controlador PID

Los datos arrojados por los sensores de temperatura y desplegados en los indicadores ubicados en el panel de la incubadora, muestran un control de temperatura adecuado para el uso de un neonato en sus primeros días de vida.

La Figura 75 muestra 3 distintas medidas recopiladas en distintas ocasiones tomando como referencia el valor configurado por el operador. El comportamiento que tiene el sensor LM35 al ir cambiando la temperatura de referencia en las 3 ocasiones indican el error mínimo que se verificó anteriormente del 0.75% en las tablas anteriores, por lo que se ve un comportamiento de sube y baja mínimo al momento de llegar al valor referido.



LM35			
Referencia	MED 1	MED 2	MED 3
31	30,6	30,3	30,8
32	31,7	31,8	31,9
33	32,3	32,5	32,8
34	33,6	33,2	34,3
35	34,1	34,3	35,2
36	35,5	35,2	36,5
37	36,8	36,5	37,2
38	37,1	37,6	37,9

Figura 75 Lectura del sensor LM35

La Figura 76 muestra el comportamiento del sensor NTC10K al compararla con la temperatura de referencia durante 3 ocasiones. El comportamiento es similar al otro sensor y se verifica el error porcentual mínimo como en el anterior caso.

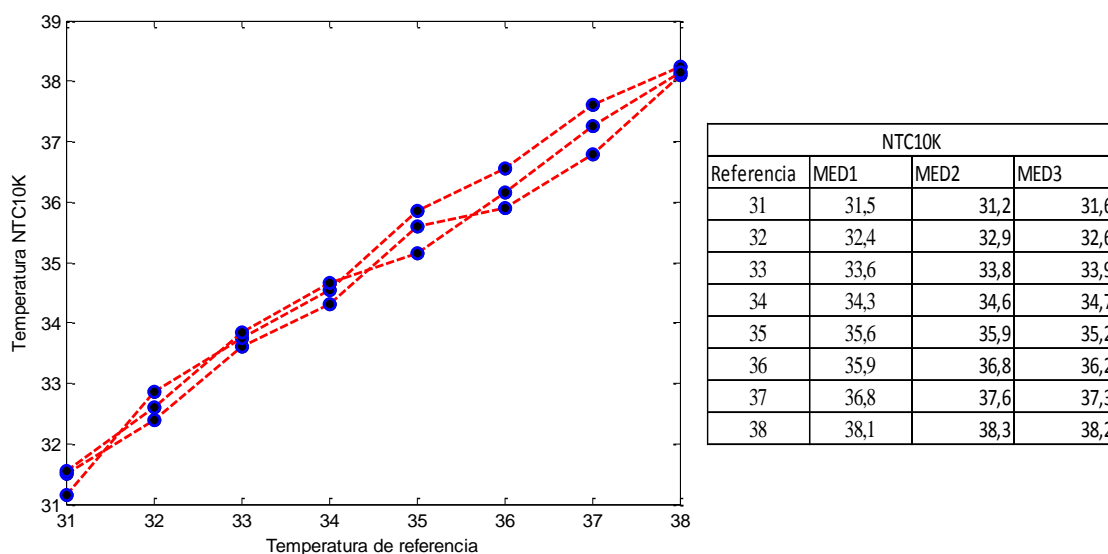


Figura 76 Lectura del sensor NTC10K

En ambas graficas se puede apreciar un comportamiento ascendente de la incubadora, además de existir uniformidad de la lectura de los sensores, esto quiere decir que entre cada valor configurado existe casi los mismo grados de diferencia de temperatura mostrando como actúa el controlador implementado tanto para el sensor de temperatura LM35 como el de piel NTC10K. Es importante verificar la diferencia de lectura de los sensores, ya que si son demasiados altos el paciente al momento de ocupar el equipo tendría complicaciones que conllevaría a la muerte del bebe.

El control PID opera estableciendo una temperatura de referencia y se estabiliza en el punto configurado manipulando los actuadores para llegar hasta el objetivo, esta figura muestra este comportamiento desde una temperatura inicial de 31°C hasta 38°C que es el rango de operación que común mente se puede usar según la Norma UNE-EN 60601-2-19 ya que si se sobrepasa estos valores podrían causar problemas al neonato, mostrando así un comportamiento adecuado del controlador.

Una vez verificado el funcionamiento del equipo, midiendo la temperatura por segmentos se realizó una prueba de funcionamiento con un valor configurado de 36°C durante 870 segundos hasta que se estabilice la temperatura, la Figura 77 y la Tabla 28 muestran los valores arrojados en la prueba mencionada.

Tabla 28
Datos obtenidos en la prueba de funcionamiento del equipo

CONTROL DE TEMPERATURA		
TIEMPO	AIRE	PIEL
0	25,9	22,89
30	26,88	24,7
60	27,86	25,79
90	29,33	27,08
120	30,3	29,15
150	31,77	29,72
180	32,75	31,56
210	34,21	32,25
240	35,15	33,75
270	36,17	34,57
300	36,66	35,82
330	37,15	37,2
360	37,63	36,87
390	37,15	36,87
420	36,66	36,87
450	37,15	37,63
480	36,17	37,09
510	35,66	36,45
540	35,15	36,56
570	36,17	35,82
600	35,15	36,13
630	35,68	35,92
660	36,66	35,82
690	36,17	36,24
720	36,22	36,14
750	36,27	36,22
780	36,14	36,22
810	36,17	36,14
840	36,27	36,22
870	36,22	36,15

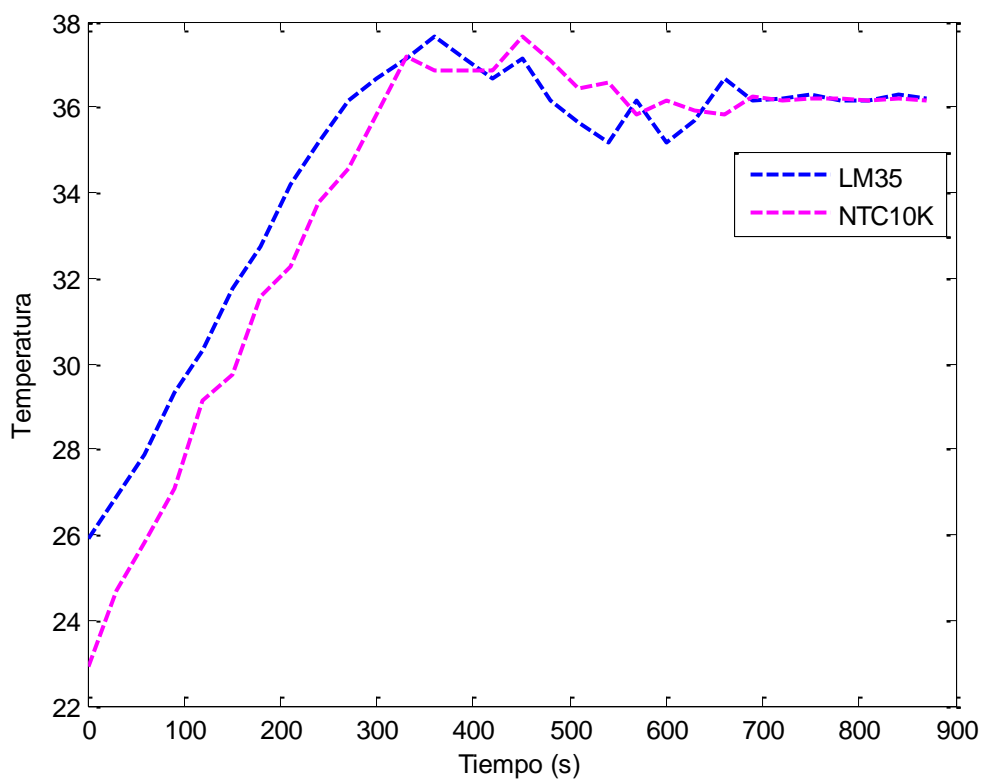


Figura 77 Lectura de los sensores durante una prueba de funcionamiento


Una vez arrojado los resultados de la prueba, se puede verificar que existe un error mínimo en el momento que se estabiliza la temperatura del equipo, este porcentaje no sobrepasa el 1% del porcentaje de error que ya se analizó. La prueba se realizó inicialmente con el equipo apagado por ende se demoró en calentar el ambiente interno de la cubierta.

Además que cumple con la normativa 201.12.1.108, rebase de la temperatura de la incubadora; que menciona que después de configurar la temperatura de referencia se tiene un tiempo máximo de 15 min para estabilizar el sistema y no excederse en $\pm 2^{\circ}\text{C}$ del setpoint.

5.3. Análisis del ruido producido por el equipo en funcionamiento

Para la medición de contaminación sonora producida por el equipo se utilizó una aplicación de un Smartphone llamada Sound Meter, la cual mide los decibelios producidos en el ambiente a través del micrófono incorporado en el teléfono, para mayor confiabilidad se utilizó un dispositivo de gama alta iPhone 6. Los datos arrojados por esta aplicación se detallan en la Tabla 29.

Tabla 29
Medición del ruido producido por el ventilador

Número de pruebas	Distancia entre el dispositivo de medición y la Incubadora Neonatal	Mediciones realizadas por la aplicación 
Dentro de la Incubadora	0cm	60.1dB
1	50cm	59.8dB
2	1m	57.3dB
3	2m	55.8dB
4	3m	54.2dB

Según la normativa UNE-EN 60601-2-19 expresa que el nivel sonoro de la incubadora a una distancia de 3m no debe sobrepasar los 60dB ya que pueden producir daños durante la estadía del bebé en la incubadora. Los datos obtenidos a diferentes distancias expresados en la Tabla 29 muestran valores que están dentro del rango de aceptación. Por lo tanto cumpliendo con la norma el equipo es capaz de mantener varios días a un neonato sin provocarle daños de audición severos.

5.4. Análisis de las alarmas y protecciones de la incubadora neonatal

El dispositivo consta de una alarma visual que se activa en el panel de control del equipo, esta se produce cuando la temperatura que ingreso el usuario no se asemeja a la temperatura leída por el sensor. Esta alarma ocurrirá si supera los 15min, tiempo en el cual la temperatura configurada y la medida deberán ser semejantes y permanecer estables.

La alarma está acompañada por un sonido que tiene la opción de ser silenciada durante 3 min, si la alarma no es corregida durante este tiempo entrara nuevamente hasta que sea atendido el daño producido. La Figura 78 muestra el proceso de funcionamiento de la alarma.

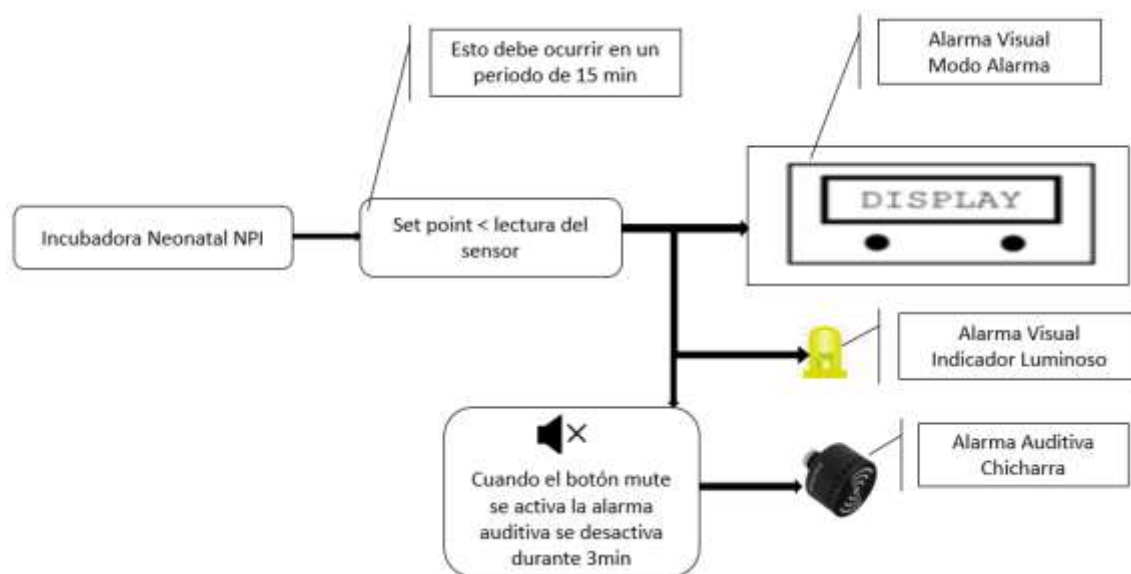


Figura 78 Diagrama de bloques del proceso de activación de la alarma.

5.5. Protección de la Incubadora Neonatal NPI

La Figura 79 muestra el interruptor térmico conectado a la alimentación de 110V de la incubadora neonatal. Esta protección del equipo basa su funcionamiento en interrumpir la alimentación eléctrica que va al equipo, si la temperatura dentro de la

incubadora sobre pasa los 40°C, se activara el interruptor desconectando la alimentación de la incubadora.



Figura 79 Interruptor térmico

El diagrama de la Figura 80 muestra el funcionamiento en bloques del interruptor térmico. Este dispositivo no tiene que ver con el sistema de control y por ser un elemento mecánico se activa independientemente a través de un sensor ubicado en el interior de la cubierta.

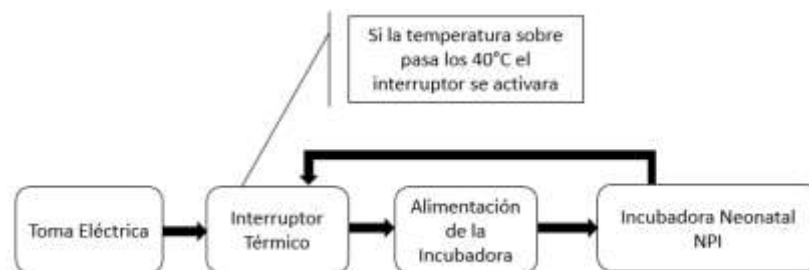


Figura 80 Proceso de protección del prototipo

Puesta a tierra de la Incubadora Neonatal

La Figura 81 muestra el proceso en el que la tierra de la incubadora neonatal está conectada al Hospital. La base metálica del equipo estará conectada a la toma eléctrica la cual al conectarse a la alimentación eléctrica se dirigirá hacia la tierra del hospital.

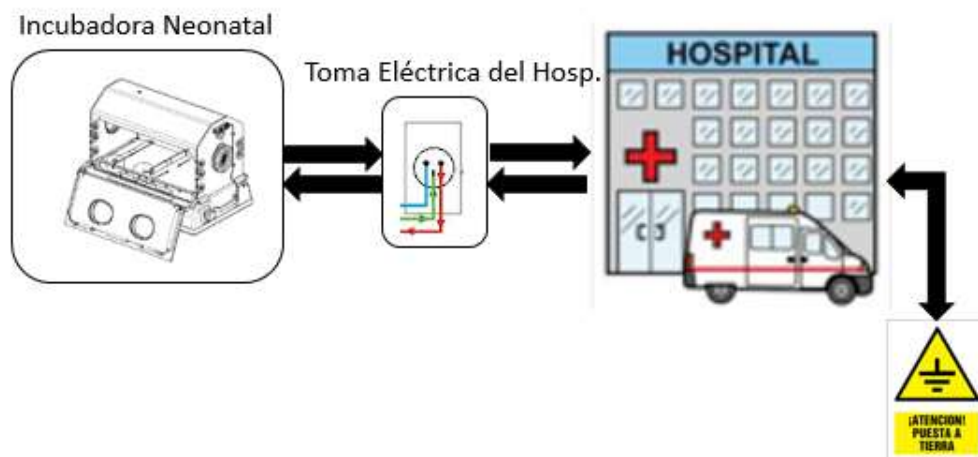


Figura 81 Puesta a tierra de la Incubadora Neonatal

Si este proceso no se sigue correctamente y el Hospital que albergue este dispositivo no tuviese una buena tierra, las complicaciones que traerá a futuro tanto para el operador como para el equipo serán muy graves. La Figura 82 muestra dos casos donde la enfermera está manipulando el equipo; en el primer caso se produce una sobrecarga que por no existir una tierra favorable le afecta directamente al operador mientras que en la segunda situación existe una buena tierra protegiendo al operador, he ahí la importancia de tener una buena puesta a tierra.

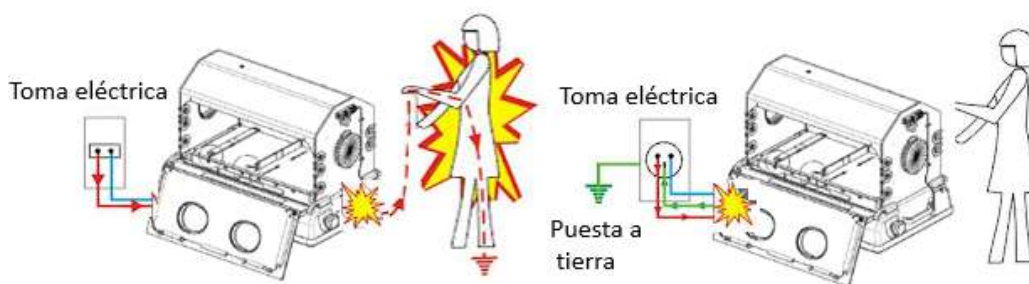


Figura 82 Manipulación del prototipo con y sin puesta a tierra.

5.6. Análisis de las normativas implementadas.

La Tabla 30 muestra las normativas que se usó en el proceso de elaboración y validación del funcionamiento de la incubadora neonatal. Se aprecia que las

normativas que se escogieron para la construcción se cumplieron y los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento fueron satisfactorios.

En el caso de las normativas que se cumplieron parcialmente no afectan en el funcionamiento esencial de la incubadora que es controlar la temperatura, más bien son normativas para mejorar el funcionamiento y cuidados del neonato.

Tabla 30
Normativas implementadas en la incubadora neonatal

Tabla de Resultados			
Norma UNE-EN 60601-2-19	Implementación		
Normativas Implementadas	No	Si	Parcialmente
201.3.201 Incubadora regulada por aire		X	
201.3.202 Temperatura media de la incubadora			X
201201.3.204 Incubadora regulada por él bebe			X
201.3.205 Habitáculo del bebe		X	
201.3.206 Temperatura de mando		X	
201.3.207 Temperatura de la incubadora		X	
201.3.208 Bebe	X		
201.3.209 Incubadora		X	
201.3.210 Temperatura cutánea			X
201.3.211 Sensor temperatura cutánea		X	
201.3.212 Condición de temperatura estabilizada		X	
201.4.3.101 Funcionamiento esencial de las incubadoras		X	

Continúa 

201.5.3 Temperatura ambiente, humedad, presión atmosférica	X
201.9.6.2.102 Nivel sonoro de las alarmas audibles	X
201.11 Protección contra temperaturas excesivas y otros peligros	X
201.12.1.108 Rebase de la temperatura de la incubadora	X

5.7. Análisis de costo de elaboración de la Incubadora neonatal

El costo de elaboración de la incubadora neonatal NPI son considerablemente inferiores al compararlos con el precio que tiene una incubadora exportada de otro país, ya que estos equipos generalmente tienen un costo aproximado de \$10000 dólares. La Tabla 31 muestra los precios de la elaboración de la incubadora neonatal en su totalidad.

Tabla 31
Costos de fabricación de la incubadora neonatal NPI

ITEM	CANT.	DETALLE	VALOR
1	1	Fabricación del base metálica de la incubadora	\$ 400,00
2	1	Fabricación de la cubierta de la incubadora	\$ 300,00
3	1	Fabricación del panel de control	\$ 70,00
4	1	Ensamblaje total y pintura	\$ 100,00
5	1	Niquelina	\$ 50,00
6	1	Ventilador	\$ 40,00
7	1	Fuente de Voltaje	\$ 20,00
8	1	Tarjeta Arduino Mega	\$ 45,00
9	1	Tarjeta Arduino UNO	\$ 25,00
10	1	SHIELD ETHERNET	\$ 15,00
11	1	SHIELD LCD	\$ 14,00
12	2	Sensor LM35	\$ 5,00
13	1	Sensor NTC10K	\$ 4,00
14	1	Relé de estado solido	\$ 18,00

Continua 

15	1	Interruptor térmico	\$ 22,00
16	2	Placa de fibra de vidrio para impresos electrónicos	\$ 30,00
17	1	Varios elementos electrónicos, cables y conectores	\$ 30,00
18	1	Programación	\$ 100,00
19	2	Diseño de Tarjetas	\$ 100,00
20	1	Copias e impresiones	\$ 100,00
21	1	Costos de investigación	\$ 100,00
22	1	Mano de obra	\$ 800,00
		TOTAL	\$ 2.388,00

Finalmente el prototipo de incubadora fue implementado en su totalidad el cual está abierto a mejoras de diseño, como bien se mencionó en párrafos anteriores se puede mejorar el control de temperatura implementando sensores en la cubierta para medir toda la área de la incubadora. Las alarmas son primordiales en los equipos médicos por ende la incubadora neonatal se podría agregar varias alarmas que indiquen por ejemplo obstrucción en los conductos de ventilación, etc.

Además se puede mejorar la interfaz HMI de la conexión a red ya que hasta el momento solo sirve para monitorear al neonato, sería interesante que este HMI también pueda controlar y recibir alarmas que sean producidas por la incubadora.

La incubadora neonatal NPI solo ha sido probada con dispositivos de medición ya que está en modo de prueba, el equipo en si no se ha probado con bebés por el hecho que es un dispositivo que alberga la temperatura y esto podría afectar al neonato sin antes tener varias horas de prueba y los permisos necesarios por la comisión de salud del País.

Manual de Usuario

Antes de usar el equipo, la persona encargada sea este el personal de mantenimiento o la enfermera tiene que estar capacitada en su manipulación además se tiene que tomar las siguientes recomendaciones de uso:

- Las fuentes de calor radiante, el sol o cualquier otro factor puede alterar el funcionamiento del control de temperatura y alarmas por lo que es aconsejable ubicar la incubadora en un área fuera de estas perturbaciones.

- No se puede acercar elementos inflamables al equipo, ya que por lo general estos equipos tienen grandes concentraciones de oxígeno que al hacer contacto con estos elementos pueden producir explosiones que afecten directamente al bebé.
- Si en algún momento se obstruye la salida del flujo de aire del equipo con mantas, pañales, etc. Esto puede poner en peligro la vida del bebé.
- Se debe mantener una constante observación de la temperatura del neonato así como la de la incubadora; esto se debe a que aparte de que el equipo tenga una alarma audible y otras protecciones el Hospital no va estar exento de apagones o fallas en las acometidas eléctricas y se puedan producir apagones.

El prototipo de incubadora neonatal consta de 3 modos de operación los cuales se detallan a continuación:

- **Primer modo:** Es un modo inicial del equipo al encenderse, es decir el equipo automáticamente activara el control hasta llegar a una temperatura de 36 °C, temperatura que esta inicializada por el administrador y recomendada por la normativa.
- **Segundo modo:** Modo Automático, en este modo el operador podrá ingresar la temperatura que desee, claro está que este dentro del rango permitido de operación, el control de temperatura lo realizara a través de la comparación con el sensor de temperatura ambiental
- **Tercer modo:** Modo servo controlado, al igual que el segundo modo el operador deberá ingresar la temperatura a través de los botones del panel y el sistema comparara con el sensor corporal hasta llegar al valor indicado.

La Figura 83 muestra la mascarilla del panel de control y las partes constitutivas que la conforma.

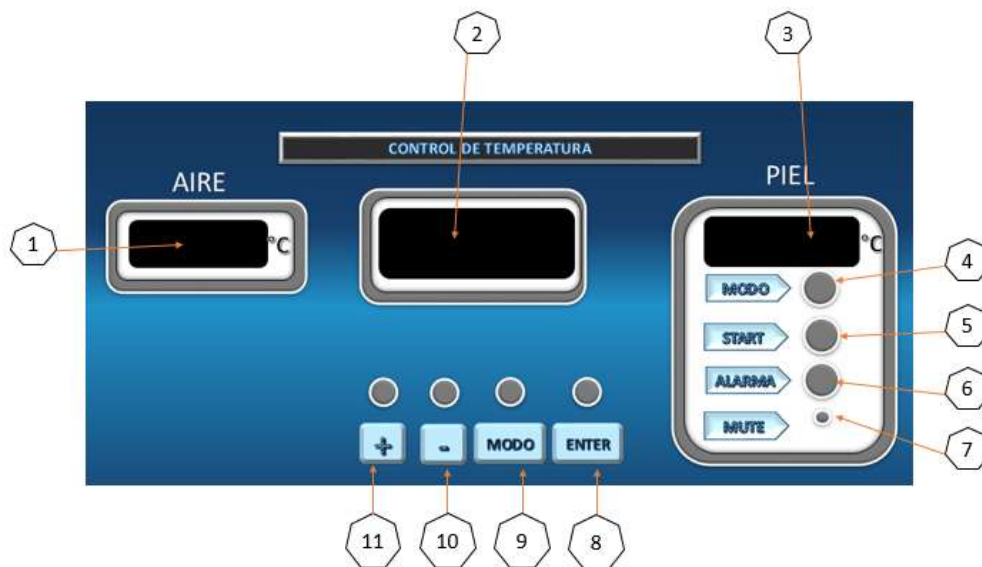


Figura 83 Panel de Control de la Incubadora Neonatal

Tabla 32

Descripción de las partes constitutivas del panel de control

1	Indicador de Temperatura de Aire	7	Botón silenciador de alarma
2	LCD de menú de modo de operación	8	Botón inicio de modo
3	Indicador de Temperatura de Piel	9	Botón cambio de modo
4	Indicador Led de ingreso a Modo	10	Botón bajar temperatura
5	Indicador Led de ejecución de modo	11	Botón subir temperatura
6	Indicador Led de alarma		

La Figura 84 presenta el estado inicial al encender la incubadora neonatal, en la pantalla LCD podemos apreciar que el equipo se encuentra en modo de espera y a los costados los indicadores de temperatura ambiental y corporal del neonato.

En este modo de espera el equipo tiene configurado internamente una temperatura de referencia de 36°C como se explicó en los anteriores párrafos. Para salir de este

modo de espera se debe pulsar el botón MODO que se encuentra en la parte inferior debajo de la pantalla LCD.



Figura 84 Modo Directo de la Incubadora Neonatal NPI

Una vez pulsado el botón de navegación MODO se cambia la pantalla e ingresa al modo servo controlado y se habilita el indicador luminoso de modo como se aprecia en la Figura 85. En este modo de operación el operador podrá configurar la temperatura de referencia desde los 30°C hasta los 39°C.



Figura 85 Ingreso al modo servo controlado de la incubadora neonatal

Una vez seleccionada la temperatura deseada a través de los pulsadores de configuración, está listo para iniciar el proceso de calefacción para lo cual se debe presionar el botón ENTER e inmediatamente se encenderá el indicador luminoso START que indica que el proceso ha empezado, como se aprecia en la Figura 86



Figura 86 Inicio del proceso de calefacción en el modo servo controlado

Si el usuario quiere cambiar al siguiente modo de operación deberá presionar nuevamente el botón de MODO e ingresara al modo Automático de la incubadora neonatal, esto se aprecia en la Figura 87.



Figura 87 Modo automático de la incubadora neonatal

Como el anterior modo de operación en este modo se selecciona la de igual forma la temperatura requerida por el operador y se presiona el botón ENTER que inicia el proceso de calefacción de la incubadora, esto se aprecia en la Figura 88.



Figura 88 Inicio del proceso de calefacción en el modo automático

En el caso de no llegar a la temperatura que se configuró en los modos, el software lanzará una alarma visual y auditiva indicando que se ha producido un comportamiento erróneo en el proceso de calefacción de la incubadora.

Este modo de alarma tendrá que se aprecia en la Figura 89 tiene la opción de silenciar la alarma por un 1m, si no se corrigió el problema volverá a sonar hasta que el operador pueda solucionarlo. La manera de salir de este modo es pulsando el botón MODE pero si no se ha corregido el problema volverá a ingresar a modo de alarma.



Figura 89 Modo Alarma de la Incubadora Neonatal

CAPITULO 6

6. Conclusiones y recomendaciones

Se diseñó un prototipo de incubadora neonatal NPI siguiendo los requisitos expuestos por la normativa UNE-EN 60601-2-19, la cual permito construir un equipo con las mismas características de cualquier otra incubadora neonatal. La recopilación de información durante este proyecto arrojó datos relevantes para mejorar el diseño a futuro.

Se implementó un control de temperatura PID el cual controla el ingreso de aire controlado, el cual ayuda a la estabilización de la temperatura dentro de la cubierta de la incubadora neonatal.

Se incorporaron librerías del IDE de Arduino las cuales poseen varias herramientas que permite escribir el código C de manera rápida y organizada, estas librerías proporcionadas por el fabricante permiten desarrollar un programa que cumpla las características para un buen funcionamiento de la incubadora.

Se realizaron pruebas con medidores de temperatura y medidores de sonido durante el funcionamiento de la incubadora, mostrando mínimas deficiencias de construcción y funcionamiento del prototipo por ende para futuras mejoras es recomendable la utilización de materiales con mejores características de construcción.

Se incorporó un sistema de monitoreo de temperatura corporal del neonato mediante el uso de un dispositivo Ethernet de Arduino el cual es una innovación en los equipos de cuidados neonatales, pues en el mercado no existen estos aparatos con estas características.

Se recolectaron datos durante periodos de operación dando como resultado un error aproximado del 1% para ambos sensores, lo que demuestra un correcto funcionamiento según la norma UNE-EN 60601-2-19, además se realizaron pruebas durante un periodo de 15 min en la que la temperatura se estabilizó tomando como referencia el setpoint configurado por el operador.

Se probó la protección del prototipo para temperaturas excesivas, donde el interruptor térmico actuó inmediatamente interrumpiendo la alimentación eléctrica cuando la temperatura del interior del habitáculo sobre paso los 40°C, mostrando confiabilidad y buen funcionamiento de la incubadora neonatal.

Se recomienda que aparte de que la tierra del conector de alimentación esté conectado a la base metálica de la incubadora, el hospital tenga una puesta a tierra en la toma eléctrica, para que se proteja el equipo y el usuario.

Se identificó que uno de los aspectos más relevantes en el desarrollo de la incubadora es la lectura de los sensores de temperatura, por tal motivo es recomendable que para el desarrollo de las ecuaciones y la regulación de las variables de lectura de los sensores, se debe comparar con medidores de temperatura calibrados para reducir errores en las mediciones del equipo.

Se analizó que las pruebas de ruido en el equipo son necesarias, ya que el ruido excesivo puede producir daños auditivos a los operadores y peor aún al neonato que ocupe el equipo, es indispensable que como prototipo deba cumplir estas características.

Por último se concluyó que a través de realizarse varias pruebas de funcionamiento, y tomando varias lecturas durante periodos largos de tiempo, el prototipo cumplió los objetivos marcados en el presente proyecto de investigación dando como resultado un funcionamiento satisfactorio del mismo.

7. Referencias bibliográficas

- ARDUINO. (2015). *Arduino Ethernet Shield*. Obtenido de Arduino Tutoriales:
<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoEthernetShield>
- ARDUINO, Pagina Oficila. (2015). *Arduino Mega*. Obtenido de
<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
- Bauer, K., & Mendes , L. (27 de 02 de 2015). *IEEE Xplore*. Obtenido de
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=7087285&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D7087285>
- BC, ELECTRICAS. (2010). *Relé de estado Sólido*. Obtenido de
<http://www.electricasbc.com/articulo/contenido/15-reles-de-estado-solido>
- Bolton, W. (2001). *Ingenieria de Control*. ALFAOMEGA GRUPO EDITORIAL.
- Cabero Roura, L., & Saldivar Rodriguez. (2007). *Obstetricia y medicina materno-fetal*. Panamericana.
- Cassisi, L. (2005-2015). *Incubadora de terapia intensiva*. Obtenido de
<http://foroalfa.org/articulos/incubadora-de-terapia-intensiva>
- CENELEC. (2015). *Comité Europeo de Normalización Electrotécnica*. Obtenido de
<http://www.cenelec.eu/>
- Certificación, AENOR: Asociación Española de Normalización y. (Enero 2010).
Norma UNE-EN 60601-2-19. AENOR.
- CET. (12 de 10 de 2011). *Historia de la incubadora*. Obtenido de
<http://www.bebesymas.com/recien-nacido/historia-de-la-incubadora>
- CIE, ISA. (2015). *Sistemas de Control*. Obtenido de Clases en Línea:
http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf

- Civantos, D. (21 de MAYO de 2010). *La mochila-incubadora para neonatos en tránsito*. Obtenido de <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2010/05/21/mochila/>
- Constanza, M. (15 de Marzo de 2012). *Termoregulación del neonato e incubadora*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/MConstanzaBl/termoregulacin-del-neonato-e-incubadora>
- CORPORATION, ARDUINO . (2015). *Arduino Ethernet Shield*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoEthernetShield>
- D&E, L. (2015). *Incubadora de terapia intensiva*. Obtenido de BUENOS AIRES: <http://foroalfa.org/articulos/incubadora-de-terapia-intensiva>
- Electric, F. (5 de Septiembre de 2013). *Que es el control PID*. Obtenido de <https://franklinelinkmx.wordpress.com/2013/09/05/que-es-el-control-pid/>
- ELECTRÓNICA, TODO. (2015). *Arduino Ventajas*. Obtenido de <http://www.todoelectronica.com/%C3%82%C2%BFpor-que-arduino-ventajas-sobre-otros-microcontroladores-p-13507.html>
- ELECTROZONA. (2015). *Fórmulas más usadas en electricidad*. Obtenido de <http://www.portalelectrozona.com/menuseccionformularios/13-contenidoformularioelectricidad/52-articuloformulaselectricas.html>
- EXPLORED. (2010). *Noticias Ecuador*. Obtenido de El gasto del presupuesto de los ministerios sobrepasa su cuota anual: <http://www.explored.com.ec/noticias-ecuador/el-gasto-del-presupuesto-de-los-ministerios-sobrepasa-su-cuota-anual-565231.html>
- Expo, M. (2015). *Incubadoras neonatales de transporte*. Obtenido de <http://www.medicalexpo.es/fabricante-medical/incubadora-neonatal-transporte-2964.html>
- González Zhindón, G., & Granda Juca, D. (2010). *morbilidad y mortalidad materno neonatal y calidad de la atención en el hospital Aida de León rodríguez Lara,*

giron. Obtenido de TESIS:

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/3479/1/MED03.pdf>

IEC, Copyright ©. (2015). *International Electrotechnical Commission*. Obtenido de <http://www.iec.ch/>

IEEE. (2016). *IEEE Xplore*. Obtenido de <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

Inc, S. R. (2015). *Calculadora variables de los termistores NTC*. Obtenido de <http://www.thinksrs.com/downloads/programs/Therm%20Calc/NTCCalibrador/NTCcalculator.htm>

INTEREMPRESAS. (2015). *Ventiladores helicoidales*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Ventiladores-helicoidales-Caexven-Serie-Ventilacion-99645.html>

INVENTABLE.EU. (2010-2015). *COMO CONECTAR UN MOSFET DE POTENCIA A UN MICROCONTROLADOR*. Obtenido de <http://www.inventable.eu/como-conectar-un-mosfet-a-un-microcontrolador/>

Klug, D. (2015). *Control PID*. Obtenido de http://www.academia.edu/16511961/Controlador_PID

LIFETEC. (2015). *Incubadora Termica Estacionaria*. Obtenido de <http://www.equiposmedicos.mx/detalle/77-incubadora-termica-estacionaria-para-bebe-modelo-yp910.html>

Newcastle, C. (2015). *Control PID*. Obtenido de CAUT1 clase 7: http://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C07.pdf

Ogata, K. (1999). *Sistemas de Control*. Mexico: Prentice- Hall Inc.

OMEGA. (2013). *Resistencias Eléctricas*. Obtenido de http://www.resistenciaselectricas.com.ec/resistencias_tubulares.htm

OMS. (Nombiembre de 2013). *Organizacion mundial de la Salud*. Obtenido de niño prematuro: http://www.who.int/features/qa/preterm_babies/es/

- PALAU, Soler. (2015). *La ventilación*. Obtenido de <http://www.soler-palau.mx/ventiladores2.php>
- PEDIATRICS, CLINICAL ASSISTANT. (20 de Noviembre de 2014). *Centers for Disease Control and Prevention. Reproductive health: preterm birth*. Obtenido de www.cdc.gov/reproductivehealth/maternalinfanthealth/pretermbirth.htm
- PNTIC, PLATEA. (2015). *Plataforma Arduino (Hardware)*. Obtenido de http://platea.pntic.mec.es/~mhidalgo/documentos/02_PlataformaArduino.pdf
- Prat, A. (2015). *INCUBADORA UCI*. Obtenido de http://www.arquimed.cl/productos/index.php?id_product=121&controller=product
- PROMETEC. (2015). *Lcd Keypad Shield*. Obtenido de <http://www.prometec.net/lcd-keypad-shield/>
- QUIMINET. (26 de Julio de 2006). *Ventiladores Industriales*. Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/que-son-los-ventiladores-industriales-15349.htm>
- TERMOKEW. (2015). *Resistencias de calentamiento*. Obtenido de <http://www.termokew.mx/resistencias-calentamiento.php>
- UNIOVI. (2015). *Hornos de Resistencias*. Obtenido de Lección 11, Clases en línea.: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion11.HornosResistencia.RESISTENCIAS.CALENTAMIENTO.pdf>
- UNT, H. (2015). *Métodos de Sintonización de controladores PID*. Obtenido de Tema 4, Clases en línea.: http://www.herrera.unt.edu.ar/controldeprocesos/Tema_4/Tp4a.pdf
- UPCOMMONS. (2015). *Sistemas de Control*. Obtenido de Capitulo 2: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>

Ventura-Juncá, D. P. (2015). *TERMORREGULACIÓN*. Obtenido de

<http://escuela.med.puc.cl/paginas/publicaciones/manualped/RNTermorreg.html>

Wang, R. (10 de Agosto de 2011). *IEEE Xplore*. Obtenido de

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6010005&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D6010005>

Zhang, L., & Runjing, Z. (18 de 01 de 2006). *IEEE Xplore*. Obtenido de

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1615359&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26arnumber%3D1615359>

Zhang, L., & Runjing, Z. (Agosto de 2007). *researchgate.net*. Obtenido de

https://www.researchgate.net/publication/6523864_Design_of_an_Incubator_for_Premature_Infant_Based_on_LabVIEW