



INSTRUMENTACIÓN BIOMÉDICA II
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

Prototipo Incubadora Neonatal

60080 - Agustina SELSER

60313 - Lucia GUIRULA

60492 - Agustina COSTA

Fecha de entrega: 18-07-2023

Índice

1. Introducción	4
2. Esquema de la Incubadora	5
3. Esquema de circuito	5
3.1. Display	6
3.1.1. Botón de Seguridad	7
3.2. Actuadores	7
3.3. Sensores	7
3.4. Controladores	8
3.5. LEDs Indicadores	9
4. Calibración de los sensores	9
4.1. Sensor de Temperatura	9
4.2. Sensor de Humedad	11
5. Sistemas de Control	11
5.1. Humedad	11
5.2. Temperatura	13
6. Funcionamiento y Consideraciones de Uso	14
7. Alarmas y seguridad	14
8. Centro Integral de Monitoreo de Incubadoras	16
8.1. Justificación	17
8.2. Internet de las cosas	17
8.3. ESP32	17
8.4. Protocolo MQTT	17
8.5. Plataforma	18
8.6. Procesamiento en Borde	18
8.7. Procesamiento en Nube	20
8.8. Dashboards	22
8.9. Mensajería por telegram	26

9. Bibliografía	28
10. Anexo	28
10.1. Circuito	28
10.2. Imágenes calibración de Temperatura	29
10.3. Calibración de Humedad	30
10.4. Incubadora Finalizada	32

1. Introducción

Las incubadoras neonatales son un dispositivo médico utilizado para dar soporte vital a los bebés recién nacidos que aún no se encuentran en condiciones de adaptarse al medio extrauterino, pueden ser tanto nacidos a término como prematuros. En cuanto a prematuros, se estima que 15 millones de infantes nacen de manera prematura por año en el mundo; más de 1 cada 10 bebés nacen prematuros y con la necesidad de una incubadora para mantener sus funciones vitales estables. En 2015 se produjeron 1 millón de muertes por nacimientos prematuros, mayoritariamente en países de bajos recursos, aproximadamente 3/4 de esas muertes se podrían prevenir con cuidados rentables como apoyo a la lactancia, atención básica para infecciones y dificultades respiratorias, y calor, éste último ítem se provee con el uso de una incubadora (1).

Los recién nacidos tienen una particular dificultad a la hora de ajustarse a los cambios de temperatura siendo vulnerables tanto al enfriamiento como al sobrecalentamiento. Esto ocurre en gran medida dado que pierden calor cuatro veces más rápido que un adulto por el bajo porcentaje de grasa corporal que poseen; y, para generar el calor necesario utilizan mucho más oxígeno ya que tienen una tasa metabólica mayor que los lactantes y adultos, la que se debe no sólo a las demandas de energía relacionadas con el crecimiento, sino también a los requerimientos relacionados con el gran área de superficie corporal y el aumento de la relación superficie-masa, el aumento de consumo de oxígeno puede generar otros problemas o insuficiencias por lo que regular la temperatura del ambiente en el que se encuentren permiten un desarrollo más adecuado (2).

Además sufren pérdidas insensibles de líquido, que son pérdidas no cuantificables dado que se dan por convección a nivel cutáneo o por evaporación en las respiraciones, éstas pérdidas en los adultos no poseen gran importancia, pero para los recién nacidos, especialmente prematuros, pueden generar trastornos como deshidratación, desequilibrio electrolítico, potencial absorción percutánea de tóxicos, entre otros debido a la delgadez de su piel, estas pérdidas además empeoran la termoregulación, pero se pueden disminuir manteniendo al neonato en un ambiente húmedo, en éste caso siendo provisto por la incubadora (3).

Dado que poseen un sistema inmune aún deprimido las incubadoras son un dispositivo médico extensamente utilizado también para proteger al recién nacido de patógenos que pueden enfermarlo gravemente.

2. Esquema de la Incubadora

3. Esquema de circuito

A continuación, se adjunta un esquema del circuito general:

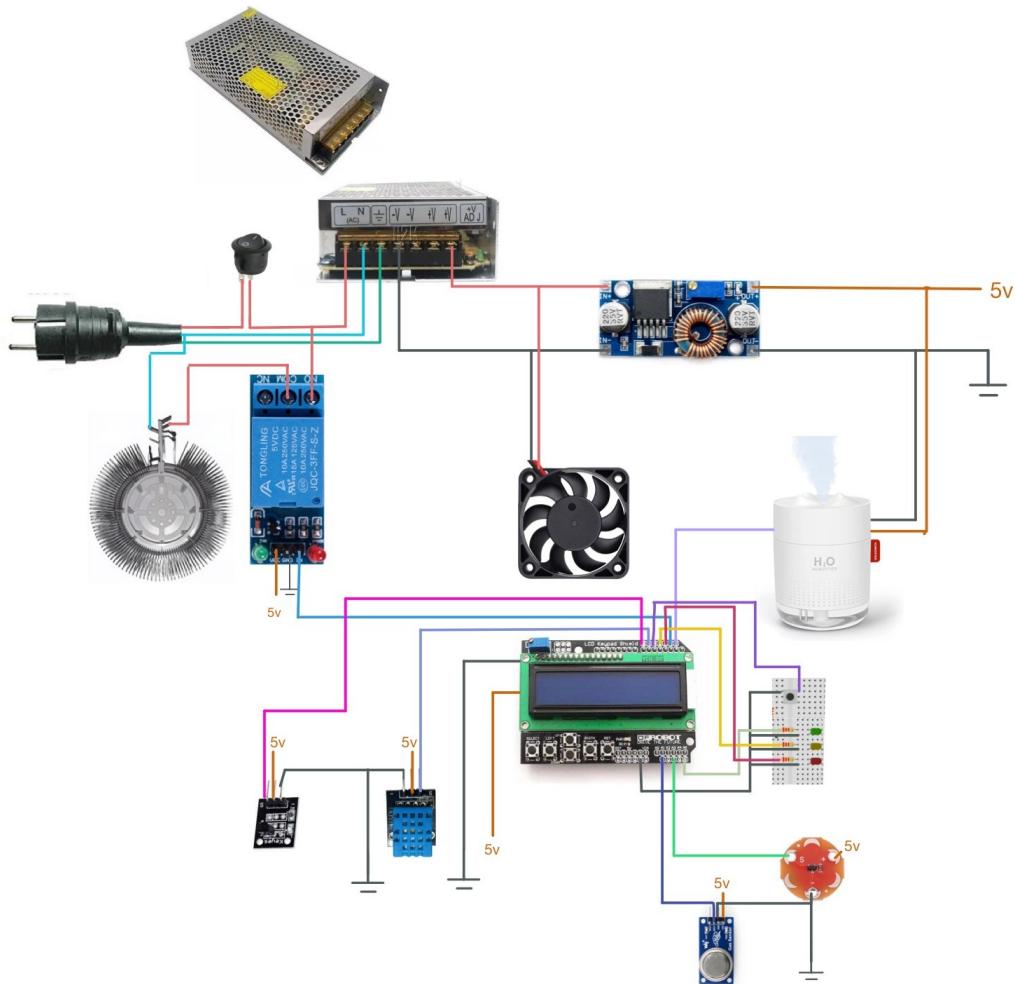


Figura 1: Esquema del circuito de la incubadora.

Se puede ver que la alimentación del equipo es de 220V en corriente alterna y pasa por un switch que permite prender y apagar la incubadora. Por otra parte se encuentra la fuente switching que entrega 12V y el módulo se StepDown X14005 que entrega los 5V.

3.1. Display

El display es la interfaz de interacción entre el usuario y el equipo que permite tanto observar los valores actuales de las variables leídas por los sensores y a su vez modificar los parámetros de configuración y control. El display utilizado es un display LCD 1602, es decir, cuenta con dos filas de 16 dígitos cada una, se conecta al Arduino UNO por medio de 12 pines, incluídos las de alimentación y un potenciómetro que permite variar la intensidad de la luz del display. El display que se utilizó estaba embebido Keypad Shield D1 Robot para Arduino UNO, que se ve en la Figura 12 y fue programado utilizando la librería de *LiquidCrystal*.

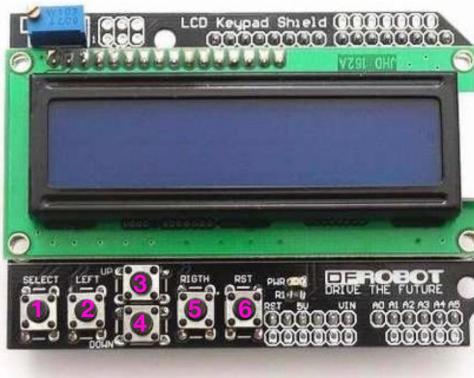


Figura 2: Imagen del display con sus respectivos botones

El botón 1 y 2 se usan para bajar y subir la humedad respectivamente. El botón 3 y 4 se utilizan para bajar y subir la temperatura. Por otra parte, el botón 5 es el de cambio de modo; y el botón 6 el reset del programa que utiliza el propio reset del Arduino.

Al encender el dispositivo sobre el display se lee “INCUBALA” y luego pasa a rotar entre las dos pantallas de información. En la primer pantalla se puede leer la temperatura del sensor del modo en el que se encuentra el dispositivo y el valor de la humedad Figura 3a. En la segunda pantalla se lee el modo seteado, el valor de CO_2 en partes por millón, y la temperatura del sensor con el que no se está controlando, Figura 3b.

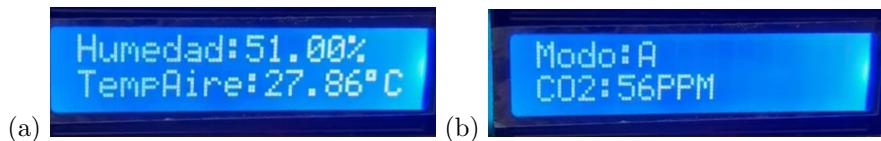


Figura 3: a - Primer pantalla. b -Segunda pantalla.

Una tercer pantalla puede aparecer en caso de que haya un error de desconexión y especifica cuál o cuáles sensores se encuentran desconectados o con error de lectura como se visualiza en las imágenes de las Figuras 4a, b y c.



Figura 4: a - Ejemplo desconexión tres sensores. b -Ejemplo desconexión dos senores. c - Ejemplo desconexión un sensor.

Se puede acceder a la pantalla de Set Up presionando el botón de seguridad, donde se especifica el Set Up elegido para temperatura, humedad y modo de temperatura, Figura 5



Figura 5: Pantalla de SetPoints habilitable con el botón de seguridad

3.1.1. Botón de Seguridad

Se dispone de un botón de seguridad separado del display. La función de éste es evitar que se pueda cambiar alguna configuración por error. Se debe mantener apretado el botón de seguridad para leer la pantalla de Set Up y poder cambiar los Set Points.

3.2. Actuadores

En el circuito se cuenta con tres actuadores: La resistencia de caloventor, el humidificador y los ventiladores. En cuanto a los ventiladores, estos funcionan con una alimentación de 12V, a una potencia de 1,92W, 2,16 (x2)y 2,4W. Se tomó la decisión utilizar 4 ventiladores encendidos constantemente debido a la alta generación de calor de la resistencia. Se tomó la consideración de que si se decidía regular los ventiladores por modulación de ancho de pulso podrían no ser lo suficientemente potentes para hacer circular el calor y eso generaría un riesgo para el paciente y para la estructura de la caja. Para la generación de calor, se utilizó una resistencia de caloventor, que se alimenta de 220V de tensión alterna y se activa cuando recibe corriente. Por otra parte, para la humedad se utilizó un humidificador de marca genérica que cuenta con 2 piezoelectricos y se alimenta con 5V. Éste no solo tiene estado prendido/apagado, sino que pueden funcionar cada uno de sus piezoelectricos por separado.

3.3. Sensores

Los sensores son aquellos que nos permitirán llevar un adecuado monitoreo del paciente y generar una retroalimentación para el sistema de control. Todos los sensores se encuentran en paralelo alimentados con una tensión de 5V que sale del Modulo Step Down Xl4005.

Para medir la humedad, se utilizó el sensor digital DHT11 que permite no solo medir la humedad, sino que también la temperatura con Arduino. Este sensor utiliza el protocolo 1-wire. Para la temperatura el rango de medición es de 0°C a 50°C con una precisión de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para la humedad el rango es de 20 % a 90 % de Humedad Relativa (RH) con una precisión de $\pm 5\% \text{RH}$.

Para la medición de la temperatura, se optó por no usar la medición del módulo DHT11, sino un sensor KY-001 ya que éste mide de manera más precisa. Este sensor tiene un rango de medición de temperatura de -55°C a 125°C y un rango de precisión de medición de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Este sensor incorpora el sensor de Dallas OneWire DS18B20 que permite la medición de la temperatura ambiente. La señal de este módulo NO es una señal analógica, si no que se trata de una línea de comunicación 1-Wire, que se interpretó utilizando la librería OneWire de Arduino.

Para medir la temperatura de la piel, se utilizó el sensor de LilyPad, MCP9700, que es un sensor de temperatura de tipo termistor. Este sensor emite 0,5V a 0°C, 0,75V a 25°C y 10 mV por grado Centígrado. Hacer una conversión de analógico a digital permite establecer la temperatura ambiente local. Es un sensor de bajo costo y bajo consumo con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ en un rango de 0°C a 70°C.

Como parámetro de medición de la calidad de aire se utilizó la medición de CO_2 del sensor de gases MQ135 que mide amoníaco, óxidos de nitrógeno, etanol, benceno, humo y dióxido de carbono utilizando una resistencia variable, la resistencia disminuye frente a mayor concentración de los gases. Se utilizó la medición analógica, que emite entre 0V y 4,2V y tiene un tiempo de PREHEAT de 20s.



Figura 6: De izquierda a derecha: Módulo Step Down XI4005, sensor DHT11, sensor KY-001, sensor LilyPad y sensor MQ135

3.4. Controladores

Para controlar la humedad, se intervino en el circuito del pulsador que se ve en la Figura 7, para que pueda ser controlado por una salida digital de Arduino. El Arduino entrega un pulso en LOW con una duración de 200ms para encenderlo y 2 pulsos espaciados por 50 ms para apagarlo.

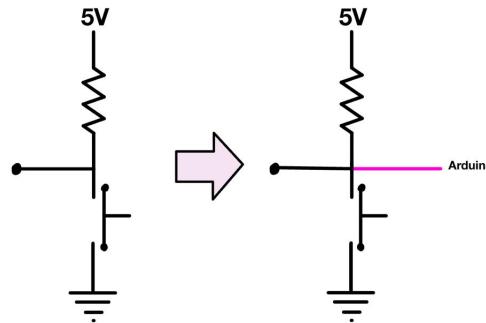


Figura 7: Esquema del circuito del botón del humidificador original (izquierda) y modificado (derecha)

Por otra parte, para la temperatura se optó por un relevador, o relé, que es un interruptor cuyo control corre por cuenta de un circuito eléctrico, por medio de una bobina y un electroimán. En nuestro caso, se conectó la resistencia al conector Normally Open, para que el circuito se cerrará solo cuando el relé se active, en nuestro caso cuando recibe GND. El relé se alimenta de los 5V que salen del Módulo Step Down Xl4005.

3.5. LEDs Indicadores

El circuito de LEDs indicadores consta de tres LEDs con una resistencia de $330\ \Omega$ cada uno y conectados distintos pines del Arduino.

El LED verde indica si el equipo está encendido y se encuentra conectado a un pin analógico del Arduino. Los LEDs rojos forman parte del circuito de alarma del dispositivo, ambos conectados a pines analógicos del Arduino.

4. Calibración de los sensores

4.1. Sensor de Temperatura

Para calibrar el Sensor de Temperatura KEYES KY001 por el método de calibración en dos puntos: el punto de ebullición y el punto triple del agua (momento donde coexisten en equilibrio el estado sólido, líquido y gaseoso)

Primero se fijan los valores de referencia. Para el triple punto del agua, la temperatura ideal que se debe observar es de 0.01°C . La temperatura de ebullición del agua depende de la presión atmosférica y por lo tanto de la altura con respecto al nivel del mar de donde se haga la calibración. Esta se realizó en el partido de Ezeiza, donde la altura a nivel del mar era de 12m.

Con esta altura, calculamos la presión según

$$P(\text{hPa}) = 1013,25 \text{ hPa} \cdot (1 - 0000225577 \cdot H)^{5,2559}$$

Esta ecuación nos proporciona la relación entre la presión atmosférica y la altitud según la Atmósfera Estándar Internacional (ISA - International Standard Atmosphere) (4). A 12m de altura, la presión atmósfera es de 1011,81hPa. Con esta presión, utilizamos la ecuación de Clausius-Clapeyron (5):

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{-\Delta H}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

donde P y T son la presión y temperatura en los distintos estados; ΔH es el calor latente de vaporización de la sustancia en J/mol; y R es la constante ideal de los gases 8.314 J/(Kmol).

Sabiendo que a una presión de 1,013.25hPa el punto de ebullición es 100°C , podemos calcular que a una presión de 1011,81hPa, el punto de ebullición es de 99.6°C

Entonces, $T_{alta}^{Ref}=99.6^{\circ}\text{C}$ y $T_{baja}^{Ref}=0.01^{\circ}\text{C}$

El siguiente paso consiste en medir con nuestro sensor, los valores de temperatura presentes en ambos procesos, T_{baja}^{Med} para la medición en el punto triple y T_{alta}^{Med} para la medición en el momento de ebullición.

Para la medición en el punto triple, y en el punto de ebullición se realizó la medición según el procedimiento especificado en (6). Para el punto de ebullición, se midió la temperatura en una olla

hirviendo. Luego, para el punto triple, se puso el sensor en un vaso con hielo al 80% lleno. Luego se le puso agua y se lo tapó de hielo para generar un buffer térmico.

Los resultados que se obtuvieron fueron los de la Figura 8 y 9



Figura 8: Gráfica para la medición de la temperatura en el entorno de ebullición del agua

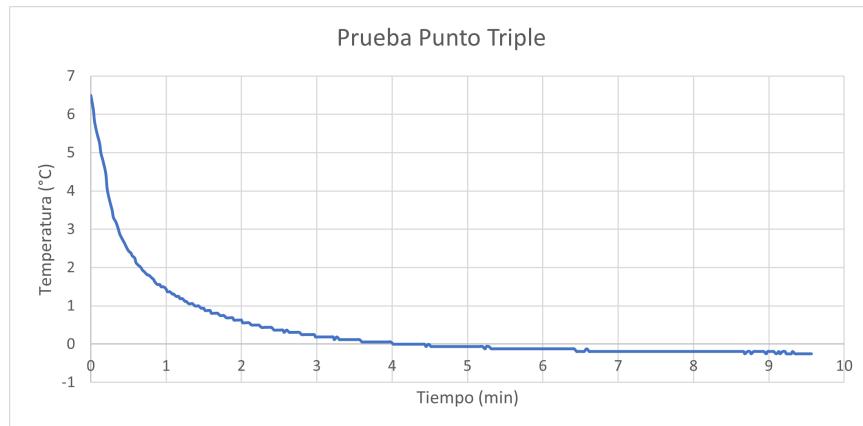


Figura 9: Gráfica para la medición de la temperatura en el entorno del punto triple para el agua

Como criterio para seleccionar un valor de medida, decidimos realizar la moda estadística (valor más repetido dentro de un conjunto de valores). Para el caso del punto de ebullición, desde el primer valor medido desde que el sensor alcanza 99°C y sube, hasta que vuelve a alcanzar el mismo valor (99°C) tras comenzar su recuperación a temperatura ambiente (retirada del sensor). En el caso del punto triple, desde el primer valor medido tras descender de 0.5°C hasta el primer valor superior a 0.5°C (en esta figura se excluyó la curva de recuperación). Los valores obtenidos fueron $T_{alta}^{Med}=99.96^{\circ}\text{C}$ y $T_{baja}^{Med}=-0.19^{\circ}\text{C}$

El último paso es adaptar la medición según la ecuación

$$T_{CORREGIDA} = \left[\frac{(T_{MEDIDA} - T_{MedBaja}) \cdot (T_{RefAlta} - T_{RefBaja})}{T_{MedAlta} - T_{MedBaja}} \right] + T_{RefBaja}$$

$$T_{CORREGIDA} = \left[\frac{(T_{MEDIDA} + 0,19^{\circ}C) \cdot (99,6^{\circ}C - 0,01^{\circ}C)}{99,96^{\circ}C + 0,19^{\circ}C} \right] - 0,01^{\circ}C$$

4.2. Sensor de Humedad

La descripción de la calibración del sensor de humedad se realizó en el Anexo 10.3. El metodo de las sales es un método práctico, sin embargo, ante la imposibilidad de conseguir una sal que genere más del 81 % de humedad relativa, se optó por no implementar la curva de calibración obtenida. Esto es porque, si bien se puede generar esa curva, ésta define un intervalo de trabajo en el cual queda fuera una parte del rango que compete a la incubadora.

5. Sistemas de Control

La acción de los sistemas de control está en función de la señal de salida, recibiendo un error que el controlador utiliza para decidir la acción a tomar sobre el proceso, con el fin de disminuir dicho error y por tanto, llevar la salida del sistema al valor deseado de manera más precisa y segura.

5.1. Humedad

El sistema de control de la Humedad se realiza mediante un sistema PID. Esto se eligió así, ya que el control PID es un sistema de ajuste y predicción automático, que proporciona una variación continua de la salida dentro de un mecanismo de retroalimentación de bucle de control para controlar con mayor precisión el proceso.

Para el armado del sistema de control primero se tomo la respuesta del humidificador, donde se lo dejo actuar hasta llegar a un punto de estabilización (figura 7). A dicha curva se le calculó la tangente al punto de inflexión y con ella se le calculó el tiempo muerto (L), el tiempo de subida (T) y la constante de variación del sistema (K), como se ve en la figura 6. Mediante el metodo de Ziegler-Nichols, se calcularon las constantes de proporcionalidad (K_p), integral (K_i) y derivativa (K_d) que luego se utilizaron para armar el sistema PID. Todas las constantes se pueden ver en la tabla.

Una vez obtenidas las constantes, se implementó el sistema de PID mediante librerías de Arduino, utilizando un sistemas de duty cycle. El código funciona como una regulación mediada por pulso (PWM) mas lenta, que traduce la salida del PID en tiempo de encendido y tiempo de apagado del humidificador.

Constantes para PID				
L	1.3550	K _p	$1.2 * T / (K * L)$	136.23
T	32.3033	K _i	$2 * L$	50.27
K	0.2100	K _d	$0.5 * L$	92.295

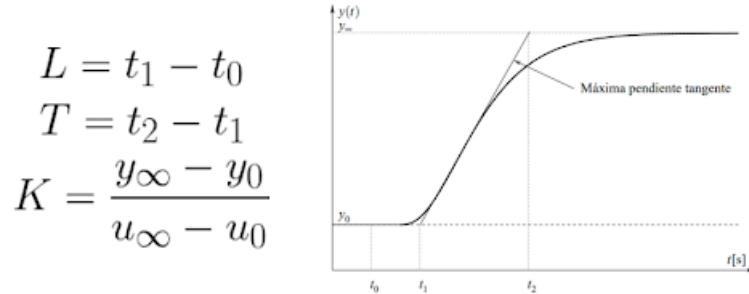


Figura 10: Sistema a lazo abierto y formulas para calcular las constantes para calcular el PID

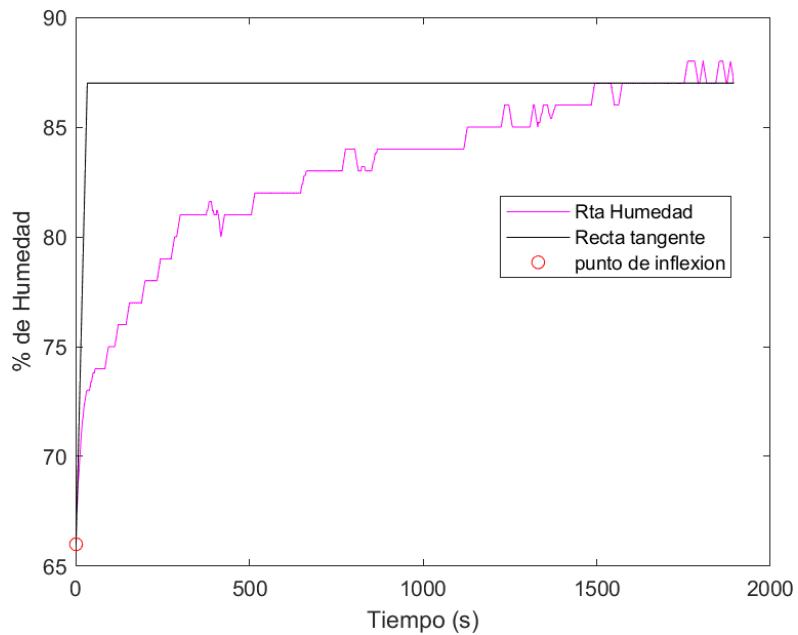


Figura 11: Respuesta de humedad, con la recta tangente y el punto de inflexión

La aplicación del mencionado controlador PID genera una curva de humedad que oscila sobre un valor fijo con un ripple de 3 %, que es un valor aceptable dado que la ANMAT permite un 10 % sobre el SetPoint elegido, y además el sensor utilizado tiene un 2 % de precisión. A continuación, se adjunta la curva de control y el SetPoint seleccionado.

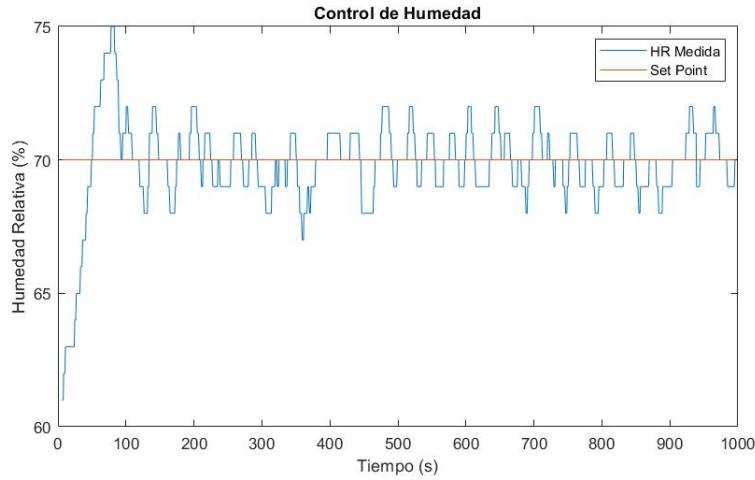


Figura 12: Control de humedad con PID.

5.2. Temperatura

Un primer enfoque fue medir la respuesta al escalón para la realización de un controlador PID. Sin embargo, al momento de obtener la respuesta, la resistencia no llegaba a estabilizarse antes de llegar a una temperatura peligrosa. Por estas razones, decidió utilizarse un controlador del tipo On-Off. Este prende la resistencia hasta que llegue al set point y en ese momento la apaga. La temperatura sigue subiendo un poco más, lo que asumimos que es efecto de la inercia térmica de los materiales, hasta que comienza a disminuir. Una vez que alcanza nuevamente el set point en su flanco descendiente, se vuelve a prender la resistencia, y así sucesivamente. Esto genera una curva de temperatura que oscila sobre un valor fijo con un ripple de $0,6^{\circ}\text{C}$. A continuación, se adjunta la curva de control con el estado del controlador.

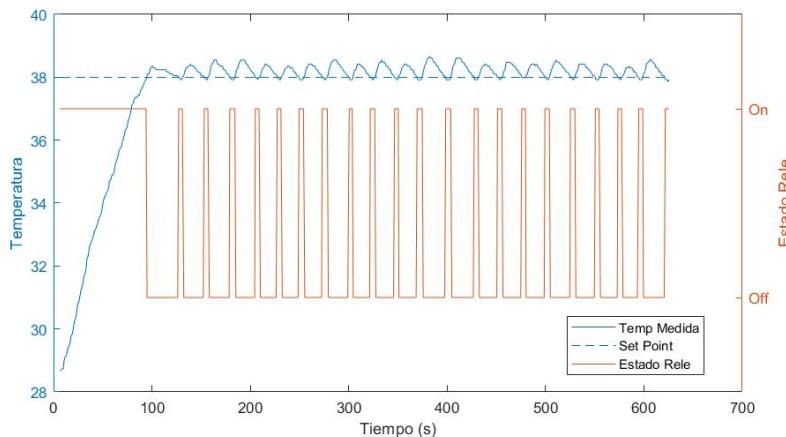


Figura 13: Curva de control de temperatura.

6. Funcionamiento y Consideraciones de Uso

Para encender el equipo lo primero que debe realizarse es la conexión a la corriente de línea. El equipo en este momento no se encenderá. Para encenderlo, se debe oprimir el botón de encendido que se ve en el esquema 1. Los cuatro ventiladores comienzan a funcionar automáticamente y se mantienen así mientras el equipo se este prendido, a su vez se enciende la resistencia, el humidificador y el LED verde. De manera predeterminada el equipo se encuentra en control por modo aire e inicializa con Set Points de control a 34°C y 40 % de humedad ya se que son los SetPoints permitidos menores del modo piel, que tiene un menor rango.

Para cambiar los Set Points o el modo de control de temperatura el usuario debe mantener presionado el botón de seguridad y luego modificar al Set Point deseado observando el nuevo valor en el display, los SetPoints tienen un rango permitido de modificación que se encuentra en concordancia con la incubadora MEDIX tomada de referencia, siendo de:

- Humedad: [40 %, 80 %]
- Temperatura ambiente: [20°C, 39°C]
- Temperatura piel: [34°C, 38°C]

Para recargar el agua del humidificador se debe: apagar el equipo para evitar una situación peligrosa, abrir la compuerta donde se encuentran los actuadores, quitar la tapa del humidificador y los bastones que humidifican, llenar el agua únicamente hasta el tope indicado, volver a colocarlo en el compartimiento en la zona indicada con la tapa y los bastones. Finalmente, se debe verificar que los cables del humidificador no estén en contacto con la resistencia antes de encender nuevamente la incubadora.

Nuestra consideración de seguridad para un correcto funcionamiento de la incubadora es que el usuario posea información sobre la temperatura dentro de del compartimiento neonatal, independientemente del modo en que el equipo se encuentre controlando la temperatura. Es por esto que si el sensor de temperatura ambiente se encuentra desconectado, la resistencia proveedora de calor se mantiene apagada. En dicho caso el usuario deberá prestar especial atención a todas las alarmas incluídas.

Si se intenta cambiar de modo aire a modo piel y el sensor de temperatura de la piel se encuentra desconectado, se avisa el error y la incubadora se mantiene en modo aire. En caso de encontrarse correctamente conectado y que se de el cambio de modo, si el Set Point se encontraba fuera de rango se modifica automáticamente al SetPoint dentro del rango permitido para dicho modo.

Antes de desconectar el sensor de temperatura de piel se debe cambiar la incubadora a temperatura en modo aire, dado que los descuidos pueden ocurrir, la incubadora presenta un protocolo de seguridad que se encuentra detallado en la sección de „alarmas y seguridad”.

7. Alarmas y seguridad

Para emular el funcionamiento y sistemas de protección de una incubadora actual del mercado se adicionó un circuito de alarmas lumínicas y de texto que aparece sobre el Display. Como medida de seguridad inicial se adicionó un LED verde que se enciende si la incubadora está encendida.

La alarma de prioridad media se armó con un LED rojo pequeño se activa, y comienza a parpadear, cuando:

- La medición de humedad se encuentra un 10% por encima o por debajo del Set Point de Humedad elegido.
- En modo aire: la medición de temperatura ambiente se encuentra 1C por encima o por debajo del Set Point elegido.
- En modo piel: la medición de temperatura sobre la piel se encuentra 1C por encima o por debajo del Set Point elegido.

Los valores fueron elegidos a partir de los permitidos según la incubadora de la firma MEDIX ICSA que setisface a los requisitos de la Disposición ANMAT N° 2318/02 sobre el Registro Nacional de Productores y Productos de Tecnología Médica.

Una alarma de prioridad alta, compuesta un LED rojo más grande, se activa cuando la medición de humedad o temperatura (en ambos modos) se encuentra fuera de los límites tolerables y sin importar el Set Point elegido. Los límites fueron tomados del Resumen Instrucciones de Uso Incubadora MEDIX Natal Care ST LX autorizado por ANMAT: PM-1077-1, y son:

- Humedad: [20 %, 90 %]
- Temperatura modo aire: [19°C, 40°C]
- Temperatura modo piel: [33°C, 39°C]

Los límites establecidos corresponden al mínimo y máximo Set Point permitidos para cada variable con la diferencia de la tolerancia mencionada en la alarma de prioridad media.

La incubadora posee un sistema de seguridad de mando a dos manos para el cambio de Set Point, éstos sistemas requieren el uso de ambas manos para ser accionados, se debe mantener presionado el botón de seguridad para que se puedan modificar los Set Points y el modo, de ésta forma se asegura que no pueda cambiarse por error al estar manipulando el dispositivo.

Teniendo en cuenta que los rangos permitidos para el Set Point de temperatura en modo aire son más amplios que para el modo piel, una medida de seguridad tomada fue que llegado el caso que el equipo se encuentre funcionando en modo aire con un Set Point permitido pero fuera del rango del Set Point de modo piel, si el usuario cambia de modo, el Set Point se cambiará automáticamente al máximo o mínimo avalado por el modo piel.

Otra medida de seguridad tomada para el cambio de modo aire a modo piel es que si el sensor de temperatura de piel se encuentra desconectado la pantalla mostrará un mensaje de error y no permitirá que se modifique el modo, como se puede ver en la Figura 14



Figura 14: Mensaje de error al intentar cambiar de modo si el sensor se encuentra desconectado.

Para verificar la conexión de los sensores y dar aviso al usuario se creó una función en el IDE de Arduino que corrobora el estado de cada sensor y lo cambia a desconectado si:

- Sensor de humedad (H): la lectura es de *nan*.
- Sensor de temperatura ambiente (TA): la lectura es de un número menor a -120 .
- Sensor de temperatura piel (TP): la lectura presenta números aleatorios con una diferencia mayor a 10 entre dos mediciones consecutivas.
- Sensor de CO_2 (CO2): la lectura presenta números aleatorios con una diferencia mayor a 30 entre dos mediciones consecutivas.

Cada uno de éstos valores que determinan que un sensor se encuentra desconectado fueron establecidos empíricamente. Si el equipo se encuentra en modo aire no se da aviso de la desconexión del modo piel.

Como protocolo de seguridad además, si la incubadora se encuentra en control por modo piel y el sensor se desconecta, pasa a control por modo aire automáticamente y da aviso al usuario como se puede ver en la Figura 15



Figura 15: Mensaje de error al desconectarse el sensor de piel.

Otro protocolo de seguridad incluido es aquel que apaga la resistencia si la incubadora se encuentra en modo aire y el sensor se detecta con desconexión.

8. Centro Integral de Monitoreo de Incubadoras

La incubadora de IncubALA se encuentra controlada mediante un display de Arduino. Sin embargo, las incubadoras comerciales ofrecen pantallas más amplias que proporcionan información adicional, como líneas de tendencia de los parámetros sensados durante su uso. En particular, las incubadoras de la firma MEDIX ICSA, cuentan con un display que muestra nombres de alarmas, recomendaciones para solucionar problemas, pantallas de tendencias de temperatura y humedad, temporizador de modos de temperatura y valores límites de alarma.

En busca de optimizar el sistema de comunicación de la incubadora IncubALA, se decidió conectar la misma a Internet mediante IoT para visualizar el estado de varias incubadoras en la sala, mostrando parámetros a controlar y alarmas pertinentes. Esto actuaría como un centro de monitoreo de incubadoras, permitiendo la conexión de múltiples incubadoras a la misma aplicación.

En Argentina, los centros de monitoreo de cuidado neonatal se enfocan principalmente en monitores multiparamétricos conectados a los pacientes, por lo que se ha decidido desarrollar un sistema de monitoreo específico para las incubadoras. Esta implementación tiene el objetivo de mejorar el monitoreo neonatal.

Dicha implementación se va a realizar mediante la plataforma ThingsBoard, una plataforma de código abierto que permite la conectividad de dispositivos a través de protocolos IoT estándar de la industria, como lo es MQTT.

8.1. Justificación

El desarrollo de una incubadora neonatal con centro de monitoreo continuo tiene el potencial de mejorar la atención neonatal y los resultados clínicos al abordar la problemática de la mala praxis médica, que ha sido identificada como uno de los principales factores que contribuyen a las muertes neonatales y las lesiones permanentes. La implementación de un centro de monitoreo inalámbrico es crucial para unificar y digitalizar la información, lo que reduce las tareas manuales y los errores humanos. Además, la ventaja de no requerir conexiones físicas mejora la circulación en la sala.

En el campo de la detección y diagnóstico temprano de eventos fisiológicos y enfermedades, los marcadores fisiológicos proporcionan información anticipada antes de que los signos clínicos se manifiesten, permitiendo la predicción de eventos como apneas y sepsis. La integración de datos en la nube genera una valiosa base de información. La disponibilidad de alarmas tanto en el lugar como de forma remota desde el centro de monitoreo permite una respuesta más rápida y la posibilidad de tomar medidas a distancia.

Para lograr estos avances, se explora el potencial de la tecnología IoT (Internet de las Cosas), permitiendo el envío y recepción de datos en tiempo real, la integración de información y la solución de los problemas mencionados. El IoT se muestra como una herramienta útil en la terapia intensiva neonatal, posibilitando la monitorización continua y en tiempo real de los pacientes, generando alertas tempranas, mejorando la eficiencia en la atención médica y facilitando la comunicación entre los profesionales de la salud. Asimismo, el IoT soluciona el problema de la disponibilidad de recursos humanos y tiene un impacto positivo en la calidad de vida de los neonatos prematuros. Además, su implementación permite la evaluación y comparación entre diferentes centros de terapia intensiva neonatal, brindando beneficios para los centros de salud.

8.2. Internet de las cosas

8.3. ESP32

En el trabajo, se implementó una solución de conexión a Internet mediante la utilización de un módulo ESP32 en combinación con un Arduino Mega. Dicha elección se realizó debido a que el Arduino Mega carece de funcionalidad WiFi incorporada, por lo que el ESP32 proporcionó la conectividad. La comunicación entre ambos dispositivos se estableció a través del puerto serie 2 del Arduino Mega, con mensajes en formato Json.

8.4. Protocolo MQTT

Para facilitar el intercambio de datos entre los dispositivos y los servicios en la nube, se optó por utilizar el protocolo MQTT. Esta elección se basó en varias ventajas que ofrece este protocolo:

En primer lugar, MQTT se caracteriza por su eficiencia y baja sobrecarga de red. Esto se logra gracias a su diseño liviano, el cual minimiza la cantidad de datos transmitidos. Además, emplea un modelo de publicación/suscripción, lo que significa que los mensajes se envían únicamente a aquellos suscriptores interesados. Así, se reduce la sobrecarga de la red y se optimiza la eficiencia del sistema.

En cuanto a la fiabilidad y la entrega garantizada de los mensajes, MQTT ofrece una solución confiable. Incluso si alguno de los dispositivos o conexiones se desconecta temporalmente, MQTT retiene los mensajes en el servidor hasta que los dispositivos vuelvan a estar en línea, asegurando

que no se pierda información importante. Esto se logra mediante la capacidad de MQTT para gestionar la calidad de servicio (QoS) y garantizar la entrega confiable de los mensajes.

La baja latencia y la capacidad de tiempo real son otro par de ventajas proporcionadas por MQTT. Este protocolo es conocido por su capacidad de entrega rápida de mensajes, lo que garantiza tiempos de respuesta mínimos. Esto resulta especialmente relevante en aplicaciones en tiempo real, donde la velocidad de transmisión de datos es crítica.

Por último, MQTT ofrece una seguridad sólida. El protocolo cuenta con opciones de autenticación y cifrado de extremo a extremo, lo que garantiza la integridad y la confidencialidad de los datos transmitidos. Esto protege la información sensible contra accesos no autorizados.

8.5. Plataforma

Para la gestión y visualización de datos, se eligió la plataforma ThingsBoard. En primer lugar, ThingsBoard permite la administración de usuarios y la asignación de permisos. Esto implica la posibilidad de tener un usuario administrador, el cual puede gestionar los permisos de otros usuarios en la plataforma. Esto brinda un control granular sobre quién puede acceder y llevar a cabo acciones en el sistema.

Además, ThingsBoard permite la creación de dispositivos, como la "Incubadora 1". Esto posibilita el monitoreo y control individualizado de cada dispositivo conectado al sistema; pero también cuenta con perfiles de dispositivos, como "Incubadoras". Estos perfiles permiten agrupar dispositivos y aplicar configuraciones comunes a múltiples unidades, como las reglas de alarma. Esto simplifica la administración y el mantenimiento del sistema. Otra agrupación que te permite es la creación de grupos de dispositivos (como podría ser Incubadoras de la sala 1), para nuevamente eficientizar las tareas.

En cuanto a la seguridad de acceso, ThingsBoard ofrece opciones para administrar las credenciales de acceso, como contraseñas y tokens de autenticación. Esto permite proteger el sistema contra accesos no autorizados y garantizar la confidencialidad de los datos.

Es importante destacar que ThingsBoard es una plataforma de código abierto y puede ser ejecutada localmente. La opción de correr la plataforma en un servidor local proporciona un mayor control y privacidad sobre los datos, y lleva a la plataforma a ser óptima para implementar en el ámbito hospitalario,

Por último, ThingsBoard ofrece una funcionalidad llamada Rule Chains" que permite procesar los datos recibidos. Mediante la definición de bloques de programación, se pueden realizar acciones específicas en función de los datos recibidos. Esto brinda flexibilidad en el procesamiento y análisis de la información.

8.6. Procesamiento en Borde

El procesamiento en el borde se hace utilizando el Arduino Mega 2560 que se encuentra conectado a los sensores, el display y controla los sistemas de humedad y temperatura. Para poder enviar los datos a la nube se conecta a través del Serial2 con un ESP32 y genera una variedad de reportes que clasificamos según el momento en el que son enviados: Inicialización, periódicos y por excepción.

Primeramente tenemos el reporte de inicialización, que se envía una única vez una vez que la incubadora se encuentra encendida. En dicho mensaje se envía:

- SET UP
 - Modo: Aire
 - SPT: 34°C
 - SPT: 40 %
- Estados de todas las alarmas en apagado
- Inicialización: 1

El valor Default de los SetPoints fue elegido a partir de los valores mínimos permitidos en el Modo Piel (cuyo rango de temperaturas aceptadas es menor). Se decidió enviar a su vez las alarmas apagadas y generar una variable de inicialización para que todas las alarmas se encuentren silenciadas durante el precalentamiento de la incubadora. Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento (5 minutos) o que la temperatura ambiente llegue al valor del SetPoint elegido, finaliza el estado de inicialización y comienzan a verificarse las alarmas. El tiempo de las incubadoras utilizadas de modelo es de 45 minutos aproximadamente de precalentamiento, en nuestro caso, y utilizando la pendiente de la curva de control de temperatura definimos en 5 minutos.

Los reportes periódicos son los que envían datos cada un intervalo definido de tiempo:

- Valor adquirido de sensor de humedad, temperatura aire y piel (cuando se encuentran conectados): cada 2,5 s sincronizado con la muestra de dicho valor en el display.
- Variaciones humedad y temperatura: cada 100s y 60s respectivamente utilizando las curvas de control para tomar la decisión. El dato se procesa en el borde, registrando el mínimo y el máximo de cada variable en dicho periodo de tiempo y enviando la resta entre ellos.
- DutyCycle del humidificador.

Los reportes por excepción son aquellos que son enviados al haber un cambio y no siguiendo un intervalo, son procesados en el borde y se analiza su estado anterior para definir si se debe enviar información a la nube:

- Modo: se envía al haber un cambio de modo.
- SetPoints: se envían si hay cambio.
- Alarmas: se envían tanto al activarse como al desactivarse.
- Relé: envía estado de prendido o apagado al pasar de uno a otro.

Es de vital importancia que las alarmas sean procesadas con cada dato instantáneo y no se deba esperar los 2.5s de los reportes periódicos para ser procesadas en la nube.

Todos los datos de cada uno de los mensajes es enviado con formato JSON desde el Serial2 del Arduino MEGA al ESP32, luego, en el ESP32 es descomprimido y nuevamente genera un String en formato JSON que es enviado al MQTT Broker.

8.7. Procesamiento en Nube

La plataforma de IoT ThingsBoard permite consultar estadísticas importantes relacionadas con el uso de las incubadoras, la precisión del producto, el sistema de control implementado y los fallos que presenta.

Las mediciones obtenidas con el procesamiento en la RuleChain de ThingsBoard son:

- TimeStamp de inicialización: se obtiene cuando llega un dato que posee inicialización y se guarda como atributo, luego se utiliza para calcular el tiempo de actividad de la incubadora.
- Tiempo de actividad de la incubadora: para obtener el dato se calcula la diferencia entre los atributos del dispositivo 'TimeStampInicializacion' y "lastActivityTime" éste último provisto por la plataforma. Se actualiza en tiempo real.
- TimeStamp de cambio de modo: se obtiene cuando llega un dato que posee cambio de Modo y se guarda como atributo, luego se utiliza para calcular el tiempo que lleva la incubadora en dicho modo.
- Tiempo que lleva la incubadora en el modo actual: se utiliza el atributo mencionado arriba y su diferencia con "lastActivityTime".
- Suma de desconexión de sensores/día, actualizado en tiempo real. Discriminado por tipo de sensor: El primer bloque se fija si el mensaje tiene un cambio de estado de la conexión de los sensores (recordemos que son por excepción). En segundo bloque, busca el valor anterior de la variable. Si el estado cambio, y se encuentra desconectado el sensor, se suma al bloque de agregación que cuenta las ocurrencias.

El procesamiento de datos realizado en la nube se puede observar en la RuleChain a continuación.

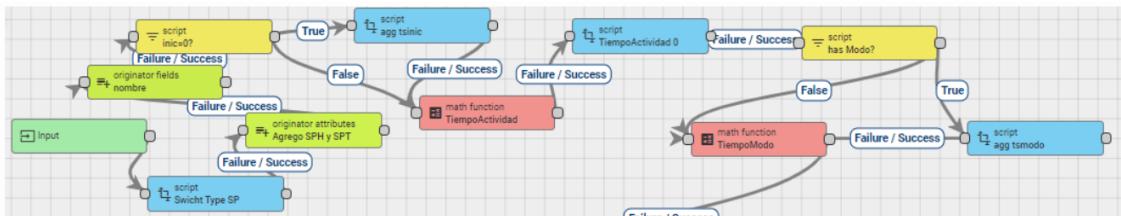


Figura 16: Rule Chain de ThingsBoard

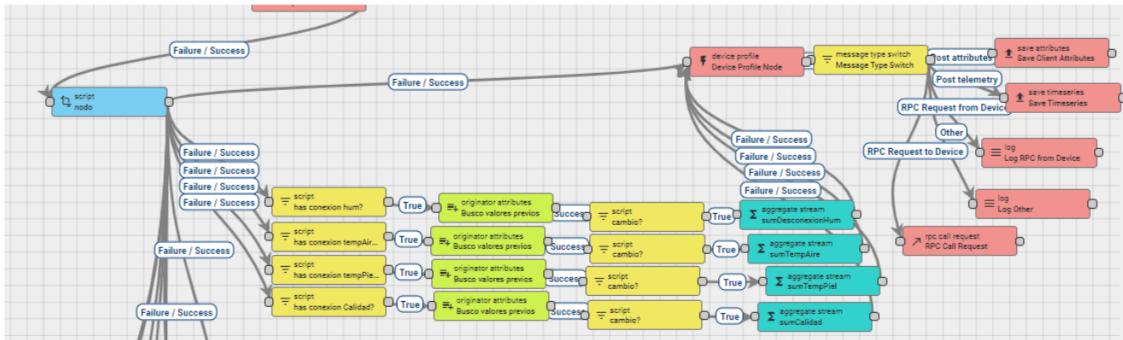


Figura 17: Rule Chain de ThingsBoard

Los datos llegan a la plataforma y pasan por el primer bloque, donde se originan atributos para los diferentes set point, y en cada mensaje esos atributos se convierten en telemetría de atributos. Luego pasa por el switch y el bloque de cuentas para calcular el tiempo de permanencia en la incubadora como se explicó más arriba y el resto de las variables arriba mencionadas.

A su vez, en la RuleChain se procesan las alarmas para enviar las notificaciones. Es importante mencionar que las alarmas poseen 3 instancias, la primera, de procesamiento en el borde, la segunda, de procesamiento para envío de notificación mediante mensajería de Telegram y la tercera las notificaciones de alarma en la plataforma y su calificación según ThingsBoard, la misma se generan en la sección del Perfil de Dispositivo provisto por la plataforma.

En la RuleChain para generar el mensaje correcto a enviar los datos pasan por múltiples nodos, en los primeros se verifica si hay alarma y para cuál variable y lo mismo ocurre con las de desconexión. En las de desconexión en caso de haber alarma se envía el mensaje directante. En el caso de alarmas de variables (Humedad, Temperatura Aire y Temperatura Piel) si se detecta que hay alarma se buscan los valores previos de SetPoint y de la variable y se observa si la variable es mayor que el SetPoint o caso contrario, para definir si es una alarma porque el valor se encuentra por debajo o por encima de lo deseado. Luego de eso, el último bloque verifica si se trata de una alarma de prioridad alta (variable fuera de rango permitido) o prioridad media (variable fuera de SetPoint) y se envía el mensaje correspondiente por la API de Telegram.

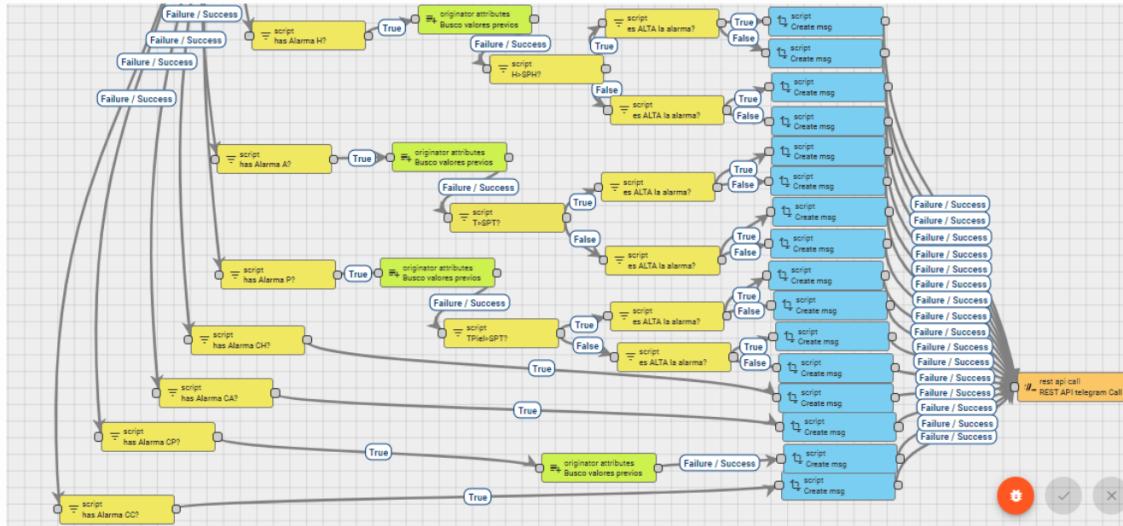


Figura 18: Rule Chain de ThingsBoard - Notificación de alarmas

8.8. Dashboards

El centro de monitoreo al que se conectan las incubadoras IoT de IncubALA posee cuatro Dashboards característicos.

El primer dashboard es integrador y permite al personal de salud ver el estado general de todas las incubadoras conectadas. Este incluye los datos de temperatura aire y piel si están disponibles, humedad, modo en el que se encuentra operando cada una de las incubadoras y valores de los SetPoints.

Además incluye la cantidad de incubadoras activas, como así también las alarmas totales contabilizadas según su severidad.

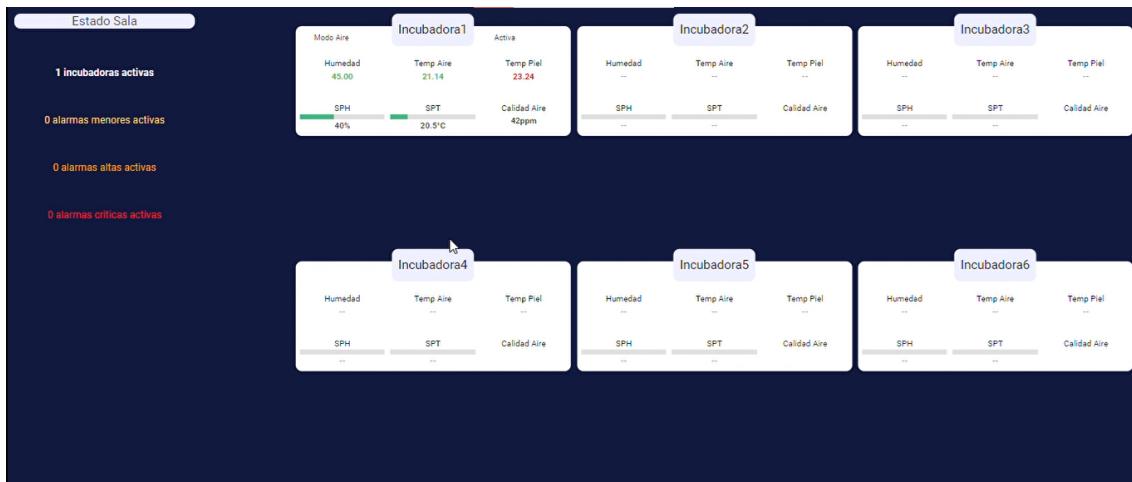


Figura 19: Dashboard de Estado Incubadoras

El segundo Dashboard también posee un paneo general de la sala, incluye un mapa de la habitación con señaladores sobre cada incubadora que cambian de color según se encuentre activa y, si posee alarmas, según la de mayor severidad. A través de éste plano se puede acceder al Dashboard propio de cada incubadora. También incluye la información de todas las alarmas activas, con el detalle de tipo de alarma y severidad, como a su vez los contadores para una vista más rápida y con código de colores.

Dado que éste segundo dashboard busca dar una visión general de la sala, en él se incluye la contabilización de las desconexiones de sensores según tipo de sensor.

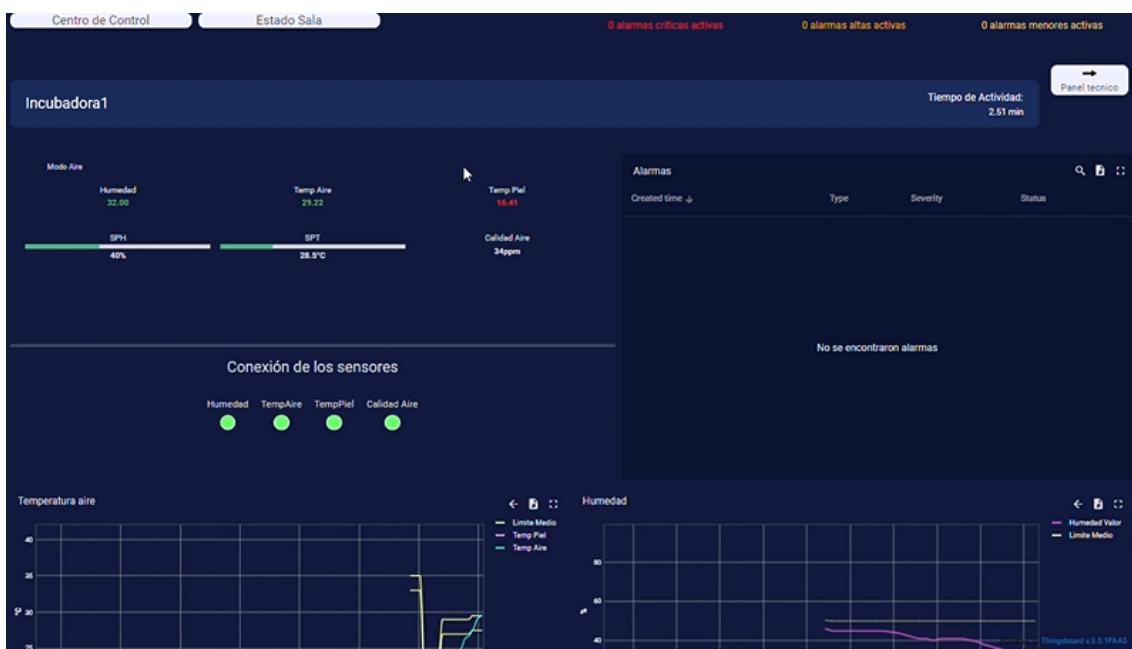


Figura 20: Dashboard de Estado Sala

Por otra parte, el personal de salud pueden acceder a un tercer dashboard específico para cada incubadora, en éste dashboard se pueden ver datos históricos y actuales de la incubadora. Los datos en tiempo real que proporciona son:

- Temperatura del aire (con color verde si el valor es aceptable o un tono de naranaja según si está levantando alarma y su severidad.).
- Temperatura de la piel (con color verde si el valor es aceptable o un tono de naranaja según si está levantando alarma y su severidad.).
- Porcentaje de humedad (con color verde si el valor es aceptable o un tono de naranaja según si está levantando alarma y su severidad.).
- Set Point de temperatura con los límites existentes.
- Set Point de humedad con los límites existentes.
- Modo en el que está operando.

- Estado de los sensores (conectado ó desconectado, en verde o rojo, fácil interpretación).
- Calidad del aire.
- Tiempo de actividad de la incubadora (o si está apagada o inicializándose)
- Tiempo de actividad en el modo actual.
- Detalle de las alarmas de la incubadora seleccionada.

Además incluye los gráfico históricos de humedad y temperatura en función del tiempo, con marcas indicando los límites medios para una evaluación rápida de la situación.

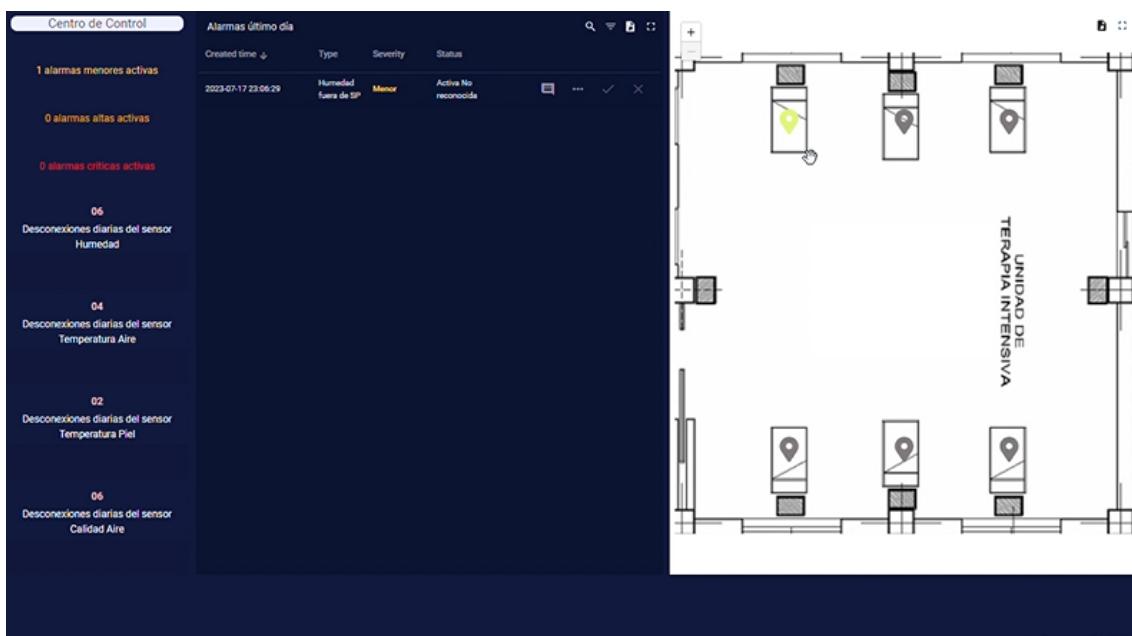


Figura 21: Ejemplo de Dashboard de detalle Incubadora

A partir de éste panel se genera acceso al cuarto panel, diseñado con un enfoque más técnico en el mismo se muestran:

- Estado del Relé en función del tiempo.
- Duty Cycle del humidificador.
- Detalle de alarmas históricas.
- Modo de control (Aire/Piel) en función del tiempo.
- Variación de Temperatura del aire y humedad en función del tiempo.
- Estado de conexión de los 4 sensores en función del tiempo.
- Contabilización de las desconexiones de sensores según tipo de sensor.

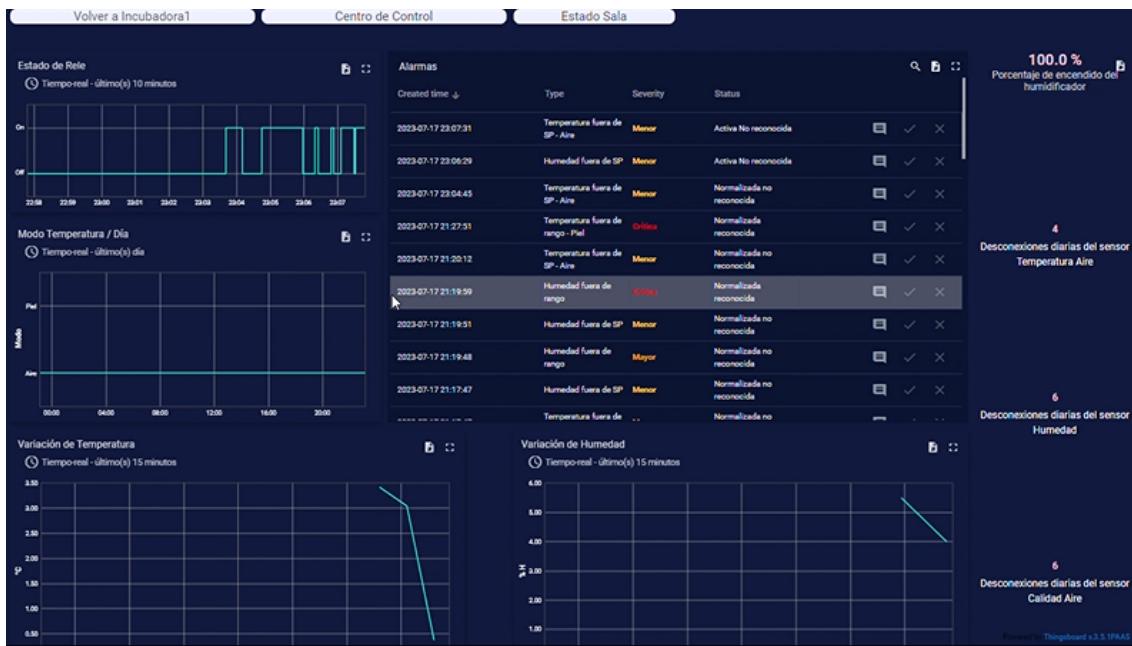


Figura 22: Ejemplo de Dashboard de detalle Técnico Incubadora

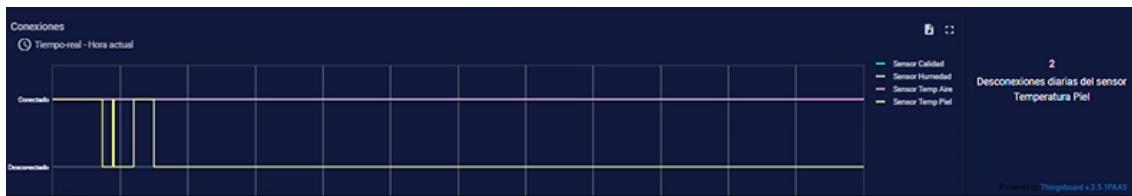


Figura 23: Ejemplo de Dashboard de detalle Técnico Incubadora

Para obtener obtener un mejor cuidado de los neonatos las alarmas se mostraran independientemente del dashboard en el que se encuentre el usuario, con un código de colores según gravedad que al presionarlo abre una ventana Pop-up con el detalle de dichas alarmas.

También es importante mencionar que todos los gráficos permiten que se modifique la venta de tiempo que se está visualizando y la importación a CSV o EXCEL de los datos.

En todos los dashboard además, se tomó la decisión de que si la incubadora se encuentra inactiva o un sensor desconectado, los valores de las variables se encuentran con un guión que represente la falta de datos y en caso de que la incubadora se encuentre en periodo de precalentamiento (mientras las alarmas no se verifican) los valores se muestran en un color gris, nuevamente para la generación de una evaluación rápida del estado de la sala y cada incubadora.

En la carpeta del examen final, puede ver un video de la plataforma funcionando (<https://drive.google.com/file/d/1R7>

8.9. Mensajería por telegram

Para finalizar, se decidió utilizar la plataforma de mensajería Telegram debido a las ventajas y funcionalidades que ofrece. En primer lugar, Telegram permite la creación de supergrupos, los cuales facilitan la administración y gestión de los miembros. El administrador tiene el control para decidir quién puede unirse y salir del grupo, así como asignar permisos individuales, lo que brinda un mayor nivel de control en el acceso y la participación de los usuarios.

Además, Telegram cuenta con una amplia base de usuarios en todo el mundo, lo cual es beneficioso para proyectos que requieren una comunicación y colaboración a gran escala. Su interfaz de mensajería intuitiva y amigable facilita la interacción entre los participantes del proyecto, incluso para aquellos menos familiarizados con la plataforma.

La seguridad y la privacidad son aspectos prioritarios en Telegram. La plataforma utiliza encriptación de extremo a extremo para proteger los mensajes y los datos compartidos, lo que garantiza la confidencialidad de la información intercambiada dentro del grupo. Además, Telegram ofrece diversas opciones de configuración para los grupos, permitiendo establecer reglas, personalizar permisos y adaptar el entorno de comunicación a las necesidades específicas del proyecto.

Los mensajes enviados tienen el formato de la siguiente imagen:

ALARMA PRIORIDAD de nombre_incubadora:

Tipo de alarma activada

-Sugerencia 1

-Sugerencia 2

Figura 24: Ejemplo de Dashboard de detalle Técnico Incubadora

A continuación, se adjunta una tabla de las sugerencias para cada tipo de alarma:

Humedad	Por arriba del rango permitido	-Verificar Humedad de Control
	Por arriba del SPH + 10 %	-Verificar Humedad de Control
	Por debajo del SPH - 10 %	-Verificar apertura de puertas -Verificar nivel de agua del humidificador
	Por debajo del rango permitido	-Verificar Humedad de Control -Verificar apertura de puertas -Verificar nivel de agua del humidificador
TempAire	Por arriba del rango permitido	-Verificar Temperatura de Control -Verificar fuente de calor
	Por arriba del SPT + 1°C %	-Verificar Temperatura de Control
	Por debajo del SPT - 1°C	-Verificar apertura de puertas -Verificar fuente de calor y controlador
	Por debajo del rango permitido	-Verificar Temperatura de Control -Verificar apertura de puertas -Verificar funcionamiento de fuente de calor -Verificar controlador de fuente de calor
TempPiel	Por arriba del rango permitido	-Comprobar ubicación del sensor -Verificar estado del paciente -Verificar Temperatura de Control -Verificar fuente de calor
	Por arriba del SPT + 1°C %	-Verificar Temperatura de Control
	Por debajo del SPT - 1°C	-Comprobar ubicación del sensor -Verificar estado del paciente -Verificar Temperatura de Control -Verificar fuente de calor
	Por debajo del rango permitido	-Comprobar ubicación del sensor -Verificar estado del paciente -Verificar apertura de puertas -Verificar Temperatura de Control -Verificar fuente de calor
Desconexión	Humedad	- Verificar conexión sensor
	Temperatura	- Verificar estado del sensor
	TempAire	-Verificar conexión sensor -Verificar estado del sensor -Verificar posición del sensor
	TempPiel	IMPORTANTE: si estaba en Modo PIEL se cambió a Modo AIRE

9. Bibliografía

1. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/preterm-birth>
2. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-53372012000100007
3. <https://revistas.uta.edu.ec/erevista/index.php/enfi/article/view/1690/1550>: :text= Las %20p %C3%A9rdidas %20insensibles %20son %20las,por %20evaporaci %C3%B3n %20a %20nivel %20respiratorio
4. <https://www.herramientasingenieria.com/onlinecalc/spa/altitud/altitud.html>
5. <https://www.calctool.org/thermodynamics/boiling-point>
6. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/10280/Analisis,caracterizacionycalibraciondesensoresdebajocosteparaArduino.pdf?sequence=1>
7. <https://www.youtube.com/watch?v=KYOJyWqB3g>

Otros links:

1. <https://www.toptal.com/c/after-all-these-years-the-world-is-still-powered-by-c-programming>
2. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/preterm-birth>
3. https://github.com/br3ttb/Arduino-PID-Library/blob/master/examples/PID_RelayOutput/PID_RelayOutput.ino

10. Anexo

10.1. Circuito

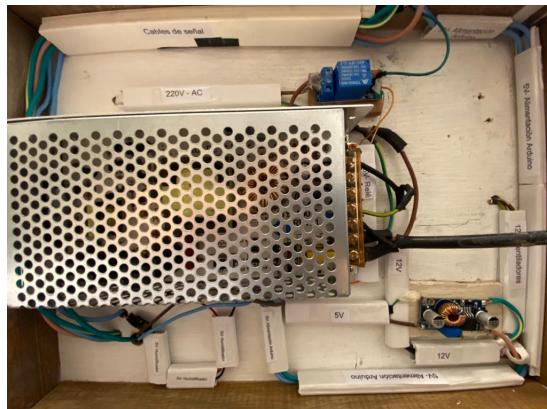


Figura 25: Circuito real de la incubadora

10.2. Imágenes calibración de Temperatura

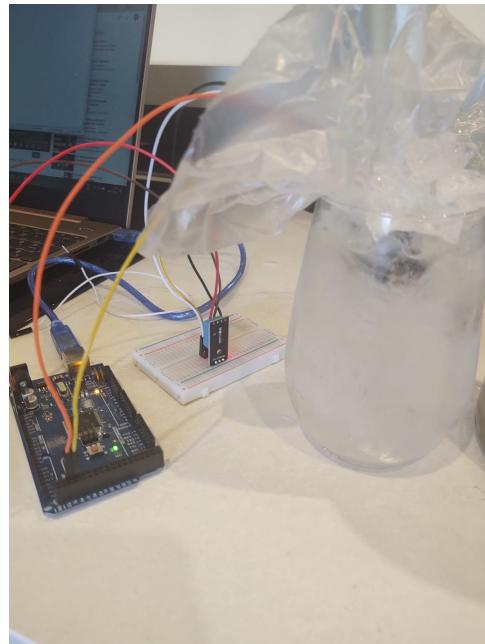


Figura 26: Calibración con punto triple



Figura 27: Calibración con ebullición del agua

10.3. Calibración de Humedad

Para la calibración del sensor de humedad se utilizó el método de calibración con soluciones de sal-agua como generadores de humedad. El método consta de mezclar cinco partes en masa de sal y una parte en masa de agua, de manera tal que quede gran parte sin disolver. Esta mezcla se introduce en un recipiente al cual se le realizó un agujero para poder ingresar el sensor. Esto proceso se llevo con cloruro de sodio y cloruro de magnesio, para poder obtener dos puntos y armar la curva de calibración. Los valores teóricos se obtuvieron de la tabla de la figura 28.

Tempera-ture (°C)	Lithium Chloride ^A LiCl· H ₂ O, %	Potassium Acetate ^A KC ₂ H ₃ O ₂	Magnesium Chloride ^A MgCl ₂ · 6H ₂ O, %	Potassium Carbonate ^A K ₂ CO ₃ · 2H ₂ O, %	Magnesium Nitrate ^A Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O, %	Sodium Chloride ^A NaCl, %
0	11.2 ± 0.5	...	33.7 ± 0.3	43.1 ± 0.7	60.4 ± 0.6	75.5 ± 0.3
5	11.3 ± 0.5	...	33.6 ± 0.3	43.1 ± 0.5	58.9 ± 0.4	75.7 ± 0.3
10	11.3 ± 0.4	23.4 ± 0.5	33.5 ± 0.2	43.1 ± 0.4	57.4 ± 0.3	75.7 ± 0.2
15	11.3 ± 0.4	23.4 ± 0.3	33.3 ± 0.2	43.2 ± 0.3	55.9 ± 0.3	75.6 ± 0.2
20	11.3 ± 0.3	23.1 ± 0.3	33.1 ± 0.2	43.2 ± 0.3	54.4 ± 0.2	75.5 ± 0.1
25	11.3 ± 0.3	22.5 ± 0.3	32.8 ± 0.2	43.2 ± 0.4	52.9 ± 0.2	75.3 ± 0.1
30	11.3 ± 0.2	21.6 ± 0.5	32.4 ± 0.1	43.2 ± 0.5	51.4 ± 0.2	75.1 ± 0.1
35	11.3 ± 0.2	...	32.1 ± 0.1	...	49.9 ± 0.3	74.9 ± 0.1
40	11.2 ± 0.2	...	31.6 ± 0.1	...	48.4 ± 0.4	74.7 ± 0.1
45	11.2 ± 0.2	...	31.1 ± 0.1	...	46.9 ± 0.5	74.5 ± 0.2
50	11.1 ± 0.2	...	30.5 ± 0.1	...	45.4 ± 0.6	74.4 ± 0.2

Figura 28: Tabla de valores teóricos de humedad

En nuestro caso la temperatura fue de 23 y 25 °C por lo que se realizó una interpolación con los valores de la figura 28. Para el Cloruro de Magnesio

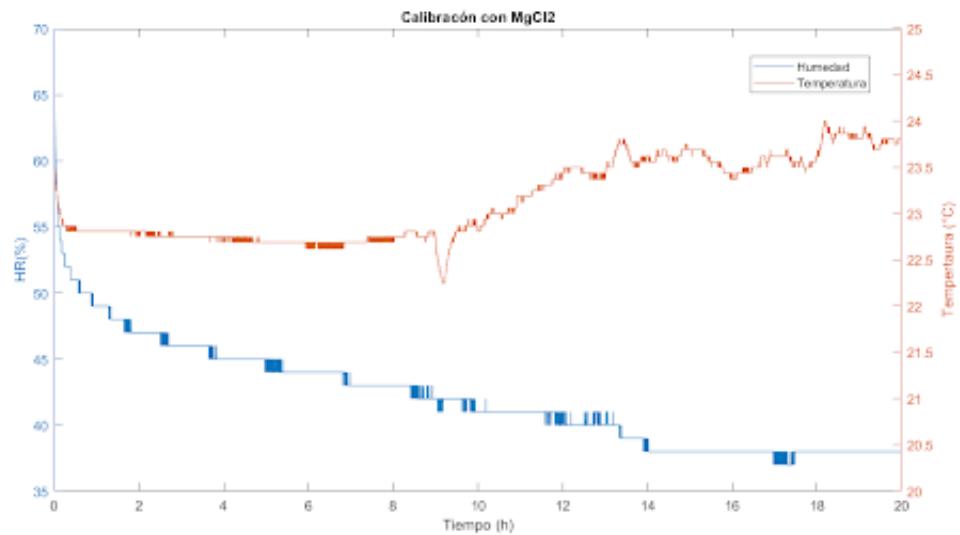
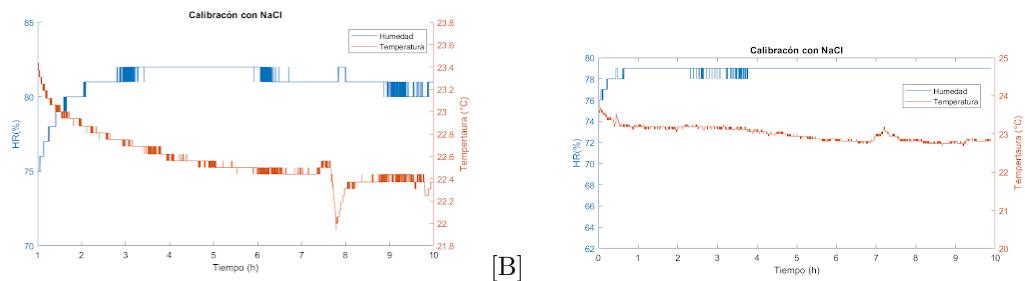
$$\frac{33,1 - 32,8}{20 - 25} = \frac{33,1 - x}{20 - 23,75}$$

A una temperatura de 23.75°C la humedad relativa debería ser 32.875En el caso del Cloruro de Sodio

$$\frac{75,5 - 75,3}{20 - 25} = \frac{75,5 - x}{20 - 23}$$

A una temperatura de 23°C la humedad relativa debería ser 75.88

La medición se realizó y se obtuvieron las siguientes curvas:

Figura 29: Curva de humedad y temperatura para MgCl_2 .Figura 30: A-Curva de humedad y temperatura para NaCl parte 1. B-Curva de humedad y temperatura para NaCl parte 2.

Se tomo como valor medido la moda de los valores de las curvas estabilizadas, y con ellas se armo la curva de calibración figura 31. Esta curva no fue implementada ya que los valores de Setpoints y sensado se encuentran fuera del rango y seria incorrecto tomar como valida esta calibración.

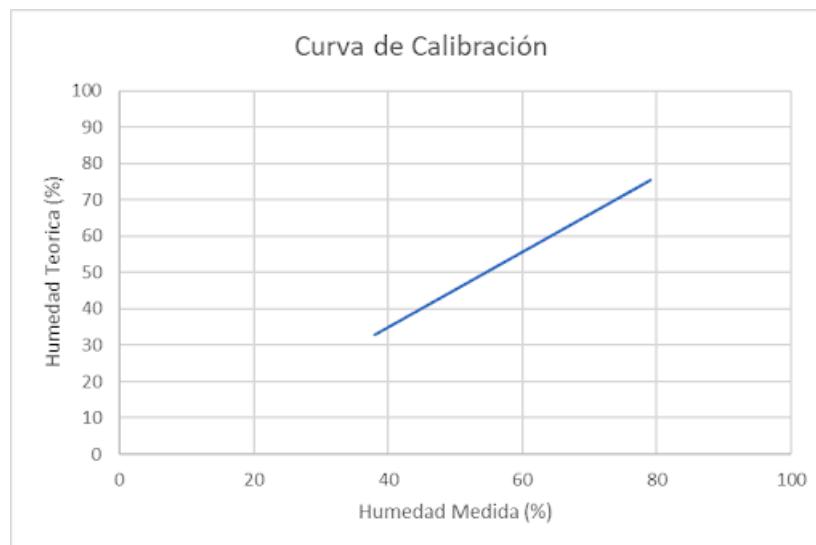


Figura 31: Curva de calibración de humedad.

10.4. Incubadora Finalizada

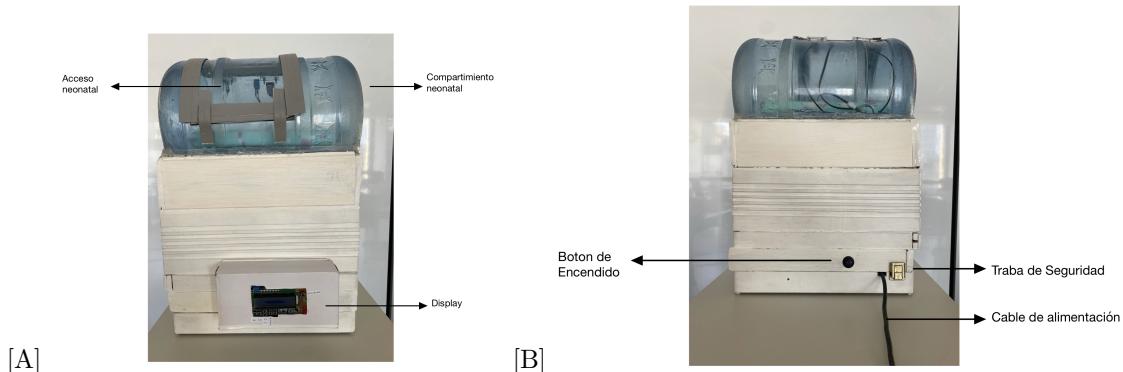


Figura 32: A-Imagen frontal de la incubadora y sus componentes. B-Imagen trasera de la incubadora y sus componentes.

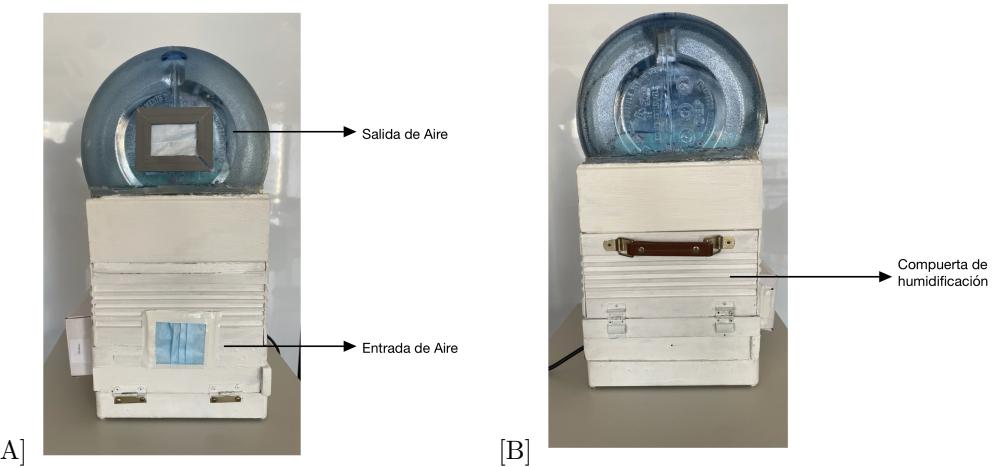


Figura 33: Imagen de los laterales de incubadora y sus componentes.

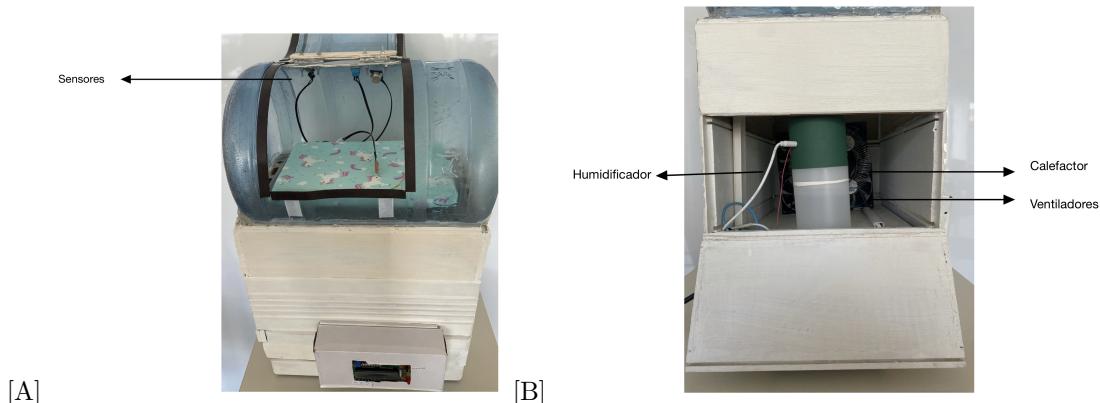


Figura 34: A-Imagen del compartimento neonatal y sensores ubicados.B-Imagen del compartimento de actuadores y los actuadores ubicados.

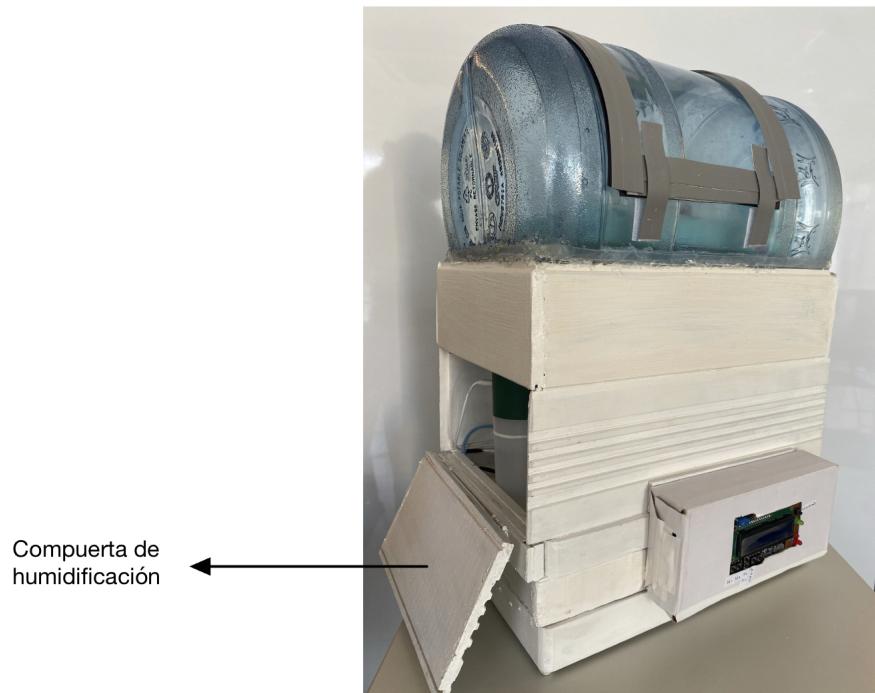


Figura 35: Imagen de la incubadora finalizada.



Figura 36: Imagen de la incubadora finalizada y decorada.