

**SISTEMA PILOTO DE MONITOREO DE VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO EN  
INCUBADORAS DEL SERVICIO DE NEONATOLOGÍA DE UN HOSPITAL DE ALTA  
COMPLEJIDAD DE BOGOTÁ, COLOMBIA A TRAVÉS DE INTERNET DE LAS COSAS  
IoT.**

**Santiago Sánchez Díaz**

**Trabajo Dirigido**

**Tutores:**

**Jefferson Steven Sarmiento Rojas y Pedro Antonio Aya Parra**



**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO  
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
PROGRAMA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA  
BOGOTÁ D.C  
2022**

## TABLA DE CONTENIDO:

1.	RESUMEN .....	3
2.	INTRODUCCIÓN .....	3
3.	OBJETIVOS .....	5
3.1.	General .....	5
3.2.	Específicos .....	6
4.	METODOLOGÍA .....	6
4.1.	Planteamiento del problema .....	6
4.2.	Desarrollo de prototipo .....	6
4.3.	Fase de pruebas .....	7
4.4.	Desarrollo de un protocolo para evaluación del funcionamiento del prototipo .....	7
5.	RESULTADOS .....	7
6.	DISCUSIÓN .....	10
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	10
8.	CONCLUSIONES .....	11
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	11
10.	ANEXOS .....	12
10.1.	Anexo 1: Protocolo para evaluación del funcionamiento del prototipo .....	12

## 1. RESUMEN

Un recién nacido prematuro es aquel neonato nacido antes de cumplir 37 semanas de gestación, representan a los recién nacidos con mayores probabilidades de presentar alguna complicación después del parto. Es por esto, que los centros de neonatología tienen gran importancia, en dichos centros permanentemente se hace uso de las incubadoras neonatales, equipos biomédicos que tienen como objetivo brindarle un ambiente cerrado y controlado que favorezca el desarrollo del bebé. Las incubadoras tienen su sistema de seguridad aprobado por los diferentes reguladores de dichos equipos, sin embargo, sus sistemas y alarmas dependen de una oportuna respuesta del equipo médico presente. Todas estas circunstancias generan la necesidad un monitoreo continuo de los parámetros de la incubadora y del recién nacido, como a su vez de una presencia continua del cuerpo médico competente.

Con el fin de brindar una herramienta de utilidad, los sistemas de Internet de las Cosas (IoT) proveen una solución al monitoreo de parámetros de manera remota. Estos sistemas permiten conectar dispositivos y componentes mediante una red WiFi local, para transmitir la información de medición y su posterior visualización. Para esta investigación, los parámetros a medir serán la humedad relativa del sistema, la temperatura en la incubadora y el nivel de ruido dentro de la incubadora. Este estudio se realizó en un hospital de alta complejidad en la donde el comité de investigaciones, el comité técnico y comité de ética avalaron su desarrollo.

A premature newborn is a neonate born before achieved 37 weeks of gestation, they represent the newborns with the highest probability of presenting a complication after childbirth. Therefore, neonatal centres have great importance in they care, these centres permanently use neonatal incubators, a biomedical equipment that aims to provide a closed and controlled environment that favors the development of the baby. The incubators have their security system approved; however, all depends on a timely response from the medical team present. All these circumstances generate the need for continuous monitoring of the parameters of the incubator and the newborn, as well as the continuous presence of the competent medical body.

To provide a useful tool, Internet of Things (IoT) systems provide a solution for monitoring parameters remotely. These systems allow devices and components to be connected via a local Wi-Fi network, to transmit measurement information and its subsequent display. For this investigation, the parameters to be measured will be the relative humidity of the system, the temperature in the incubator and the noise level inside the incubator. This study was carried out in a high complexity hospital where the research committee, the technical committee and the ethics committee endorsed its development.

## 2. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en al año se producen 15 millones de nacimientos prematuros (partos realizados antes de cumplir 37 semanas de gestación) a nivel mundial teniendo una mayor prevalencia en países con bajos ingresos, siendo además la primera causa de mortalidad en niños menores de 5 años [1]. Es común

que en los neonatos sobrevivientes se presente alguna discapacidad, debido a que los nacimientos prematuros son los responsables del 50% de la discapacidad infantil, física, neurológica o de aprendizaje. Por otro lado, el índice de mortalidad puede ser elevado o bajo, dependiendo de complicaciones asociadas al parto o manejo post parto y atención al neonato [2].

Si bien los partos a pretérmino ponen en duda la supervivencia del recién nacido, también implican un gasto elevado para sus tratamientos y cuidados en los centros especializados [3]. Según un estudio realizado en Chile, el costo de la atención de recién nacidos prematuros menores a 34 semanas de gestación son mayores que los requeridos para la atención de recién nacidos a término [3]. Donde también se encontró que dentro de los parámetros evaluados (consultas, días cama, exámenes de laboratorio, imagenología, intervenciones quirúrgicas, procedimientos, medicamentos, insumos y prestaciones especiales) el más costoso fue el día cama, el cual superó el 60% del costo total en todos los casos de nacimientos prematuros tenidos en cuenta (menores a 34 semanas, menores a 32 semanas y menores de 1500 gr de peso) [3]. Por su parte, la organización sin ánimo de lucro *March of Dimes*, determina que por el costo anual de cada nacimiento prematuro se podría el costo de la atención médica de casi una docena de nacimientos sanos y a término [4]. Los gastos de un nacimiento prematuro y/o con un peso menor de los 2.500 gr, desde el día del nacimiento hasta el primer año de vida oscilan entre los \$50.000 dólares estadounidenses en promedio y en general los nacimientos prematuros cuestan al año \$26 mil millones al sector salud [4].

Un aspecto relevante en los centros de neonatología es la seguridad del recién nacido, debido a la alta vulnerabilidad que presentan y los riesgos que les representa estar internados en un centro de atención médica. Es por esto, que las Unidades de Cuidados Intensivos Neonatales (UCIN) deben reportar sus eventos adversos puntualizando en el tipo de evento, etiología, evolución y mecanismos y/o medidas de prevención [5]. Un evento adverso se define como el daño, lesión o muerte (evento centinela) no intencional causado por el tratamiento o procedimiento realizado por el personal de salud, y que no obedece a la propia enfermedad o estados subyacentes, los cuales se estiman que afectan un 10% de los pacientes admitidos en los hospitales [5] [6]. En cuanto la frecuencia de los eventos adversos, según un estudio realizado en Brasil se obtuvo que la dermatitis perineal fue el evento adverso con mayor frecuencia [6].

A nivel mundial la OMS establece que se deben tener metodologías de vigilancia a dispositivos médicos usados, con el fin de garantizar la calidad, seguridad y eficiencia mediante controles post-mercados [7]. Con el fin cumplir con estas estipulaciones un procedimiento esencial a realizar son las calibraciones, donde se establece la relación de las variables entre el instrumento de medición y un equipo patrón [7]. Además de esto, la calibración busca determinar los errores de las mediciones para minimizar la incertidumbre de los instrumentos y así asegurar una trazabilidad de los datos adquiridos por dichos instrumentos [8].

Hoy en día el Internet de las Cosas (IoT) está desarrollando y modernizando la industria para adentrarse en la llamada industria 4.0. Estos sistemas están en pro de la conexión entre cosas – usuarios o cosas – cosas, basado en esta premisa los sistemas IoT buscan que los propios sistemas o dispositivos electrónicos (cosas) generen contenido en internet para ser consumida por usuarios u otros dispositivos electrónicos [9]. Esta tecnología es

muy usada para el monitoreo de parámetros de manera remota, para realizar esta aplicación existe un diseño de etapas general o básico, presentado a continuación [9]:

- Adquisición de datos: Hardware compuesto por un sistema electrónico que mediante sensores realiza la medición de datos.
- Procesamiento y conexión a internet: Hardware compuesto por un microcontrolador que permita esta interfaz.
- Plataforma en internet: Software que permite un servicio de almacenamiento en la internet.
- Sitio web: Software que permite la visualización de los datos transmitidos.

Si bien no se reportan estudios realizados en el monitoreo de incubadoras a través de este sistema hasta la fecha. No obstante, en el sector salud se han venido realizando investigaciones con el fin de implementar sistemas IoT, como, por ejemplo, en prototipos de monitoreo de presión arterial [10]. Donde las conclusiones que se obtuvieron demuestran resultados aceptables en las pruebas realizadas, sin embargo, la exactitud y precisión de los datos adquiridos fueron discutibles [10]. Por otro lado, estos sistemas IoT brindan una oportunidad de realizar desarrollos a bajo costo y alta funcionalidad. Como lo es el caso del monitoreo de pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica, mediante la medición constante de la temperatura corporal, saturación de oxígeno y frecuencia cardíaca. En este caso, se implementó el sistema con sensores de bajo costo, donde mediante un estudio de *benchmarking* se demostró que se redujo el costo al 50% comparado con la solución IoT más económica encontrada en el mercado [11]. Bajo la misma premisa, se desarrolló en Estados Unidos una plataforma de imágenes remotas de bajo costo que permita la obtención y monitoreo por parte de los científicos y laboratoristas durante las restricciones propias de la pandemia [12]. Para finalizar con estos ejemplos, está el diseño de un prototipo confiable de bajo costo que monitoree los parámetros vitales del cuerpo humano y envíe datos a la nube y alerte al paciente a través de una aplicación adecuada, con el fin de obtener un diagnóstico adecuado y brindar un servicio más rápido [13].

El objetivo central de esta investigación es evaluar la implementación de un dispositivo de medición de parámetros de funcionamiento de una incubadora neonatal de un hospital de alta complejidad a través del Internet de las Cosas (IoT), mediante pruebas de funcionalidad y el uso de la estadística en las mediciones. Para ello se avaló el desarrollo de la investigación por el comité de investigaciones, el comité técnico y comité de ética de un hospital de alta complejidad.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. General**

Evaluar la viabilidad de la implementación de un dispositivo de medición de parámetros de funcionamiento de una incubadora neonatal de un hospital de alta complejidad a través del Internet de las Cosas (IoT), mediante el establecimiento de un protocolo para realizar pruebas de funcionalidad del dispositivo en un hospital de alta complejidad de Bogotá, Colombia.

### **3.2. Específicos**

- a) Justificar mediante una revisión de literatura el uso de la tecnología de IoT para garantizar una trazabilidad y llevar a cabo el control de las variables (temperatura, humedad relativa y sonido).
- b) Identificar la arquitectura adecuada al proyecto para la captación y recolección de datos de las variables en el ambiente clínico específico de las incubadoras del servicio de neonatología de la institución.
- c) Formular un protocolo para la medición remota de temperatura, humedad relativa y sonido durante las pruebas de funcionamiento de la incubadora.
- d) Evaluar la funcionalidad del prototipo mediante una prueba de descarga.

## **4. METODOLOGÍA**

En desarrollo del prototipo de medición de parámetros de funcionamiento de una incubadora neonatal a través del internet de las cosas (IoT), se realizó de unas fases a seguir que son las siguientes, planteamiento del problema, desarrollo del prototipo, fase de pruebas y para finalizar, el diseño de un protocolo para la implementación del dispositivo.

### **4.1. Planteamiento del problema**

Para esta fase se realizó una investigación en temas relevantes y de interés como lo son la industria 4.0 en salud, el internet de las cosas (IoT) y problemáticas en centros médicos. Así se logró evidenciar algunas problemáticas comunes y posibles métodos para sus soluciones. Con estas ideas se realizó un documento de revisión de literatura enfocado en incubadoras neonatales, su historia y sus principios de funcionamiento, en aplicaciones de sistemas IoT para el monitoreo de parámetros y sus posibles usos en salud.

### **4.2. Desarrollo de prototipo**

Partiendo de la información recopilada y nuevos conocimientos adquiridos, se realizó el desarrollo del prototipo bajo la premisa de la conexión de “objetos/cosas” para suministrar información a una nube para su visualización y ser aprovechada por usuarios específicos.

Para la adquisición de los datos de temperatura, humedad y sonido se usaron los sensores DHT11 (sensor de temperatura y humedad) y KY-038 (sensor de intensidad de sonido), los cuales son los encargados de tomar datos para su posterior procesamiento.

Seguido a esto, para el procesamiento de datos se dispuso de un microcontrolador y un módulo WiFi integrado en el módulo ESP-32, programado mediante Arduino con todas las funciones esenciales para realizar las operaciones necesarias. Este módulo, que es un SoC (*System on Chip*) que ofrece comunicación Wi-Fi y Bluetooth de 2,4 GHz, lo cual sumado a su modo de ultra bajo consumo de energía lo hace ideal para aplicaciones en sistemas móviles y de IoT [14].

Continuando con el desarrollo, el protocolo de comunicación se usó un módulo WISOL SFM10R4 debido a que permite la recepción y transmisión de datos a través de la red

Sigfox y su modo de ultra bajo consumo de energía [15]. Dicha red, Sigfox, es una red de IoT mundial que permite la conexión de una APP y la API de Sigfox recibir datos y disponerlos en una interfaz para su visualización [16].

Para finalizar, se calculó el voltaje de funcionamiento requerido para el prototipo, el cual está en un rango de [3.3 V a 5 V]. Con lo cual, se determinó que el voltaje suministrado al dispositivo se puede realizar con un par de batería AAA de 1.5 V.

#### **4.3. Fase de pruebas**

Para iniciar, se diseñó un estudio correlacional entre las horas de uso y el voltaje que las suministradas por las baterías al prototipo. Para ello, se investigó sobre las incubadoras que se disponen en el hospital con el fin de determinar los rangos de funcionamiento de las variables que se tienen en cuenta en este estudio. Con estos rangos se calibró el dispositivo y se preparó para realizar mediciones del ambiente y comprobar así la adquisición de datos y la muestra de estos en la interfaz de Sigfox, asegurando también su completo funcionamiento.

Continuando con las pruebas requeridas, se caracterizó la descarga del dispositivo mediante una curva. La cual se realizó mediante la medición de los voltajes de las baterías del dispositivo mientras se mantuvo en funcionamiento continuo. Para complementar esta prueba, se realizó un test de batería con el analizador KEITHLEY 2281S-20-6 Precision DC Supply & Battery Simulator para determinar valor como la resistencia en serie equivalente, la corriente de consumo y la capacidad de la batería diseñada en el analizador para simular el par de batería alcalinas AAA a usar [17].

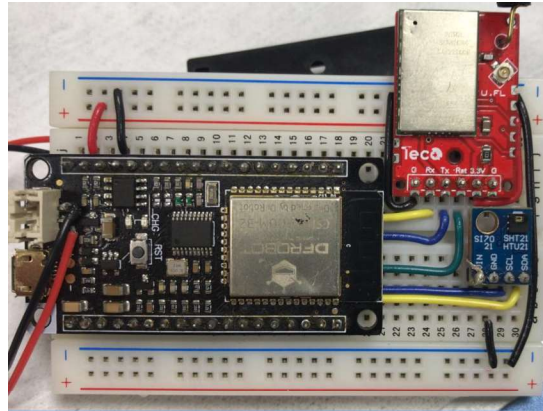
#### **4.4. Desarrollo de un protocolo para evaluación del funcionamiento del prototipo**

Para el diseño del protocolo, se consultó sobre las incubadoras disponibles del hospital y los protocolos de mantenimiento preventivo de estas. Por otro lado, basándose en los manuales de servicio de diferentes incubadoras se busca identificar parámetros y procesos para determinar el correcto funcionamiento de la incubadora respecto a medidas de temperatura, humedad y ruido.

### **5. RESULTADOS**

A continuación se presentarán los diferentes resultados obtenidos del desarrollo de esta investigación.

Inicialmente, en el desarrollo del prototipo logró pasar de un montaje de protoboard (Ilustración 1) a un montaje SMT (Surface-mount technology) con las mismas características de funcionalidad y componentes. Demostrando su funcionamiento mediante la visualización de mediciones tomadas en un ambiente de laboratorio a través de la plataforma de SigFox.



*Ilustración 1. Montaje del prototipo en protoboard.*

Por otro lado, de la investigación de diferentes manuales de servicio se llegó a determinar los rangos de operación de la temperatura y humedad, protocolos de mantenimientos preventivos para determinar el funcionamiento de los parámetros de temperatura y humedad. Adicionalmente, tanto la Academia Americana de Pediatría (AAP) y la OMS establecen como recomendación evitar ruidos mayores a 45 dBA, por lo cual es necesario tener el sensor calibrado en un rango que este valor se pueda medir con gran exactitud [18].

Parámetro		Valor mínimo	Valor máximo	Incremento mínimo	Unidades
Temperatura	Ajustable	23,0	39,0	0,1	°C
	Visible	20,0	42,0		
Humedad	Ajustable	40	95	1	%
	Visible	15	99		

*Tabla 1. Rango de parámetros de temperatura y humedad de la incubadora neonatal Atom Model 101.*

En la tabla 1 se exponen los parámetros de temperatura y humedad con los valores mínimos y máximos que permite configurar haciendo una vista general de todos los modos de uso de la incubadora neonatal Atom Model 101 [19].

Parámetro	Valor de control	Unidades	Incertidumbre aceptable
Temperatura del aire	36,0	°C	±1°C
Humedad interna	90	%	±10%

*Tabla 2. Inspección de rendimiento y control de la temperatura del aire y humedad de la incubadora neonatal Atom Model 101.*

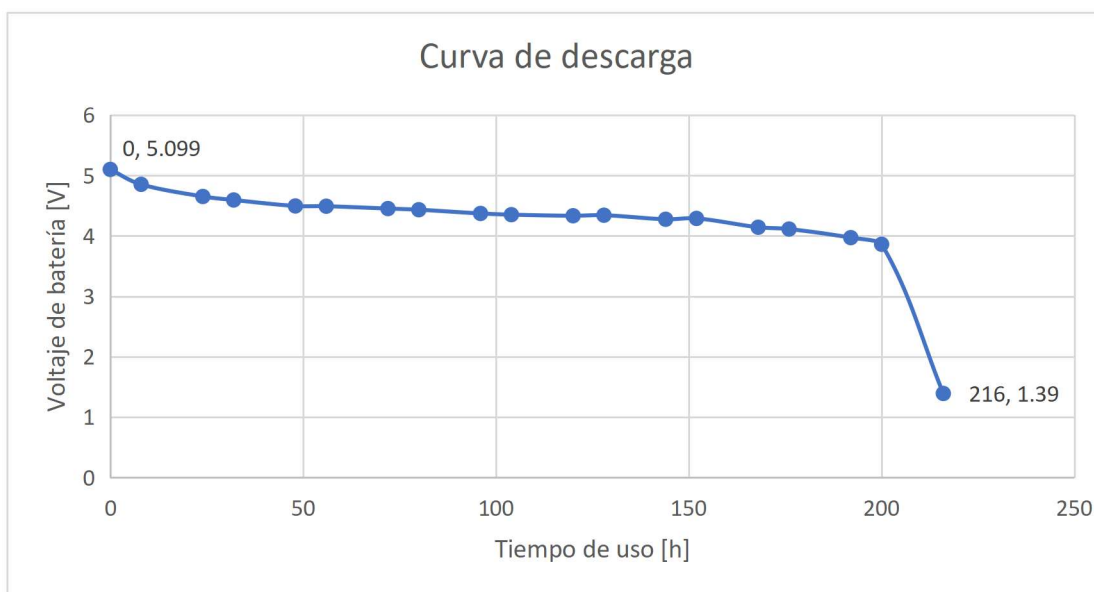
En la tabla 2 se presentan los valores de control de temperatura y humedad a los que se busca estabilizar en la incubadora con sus respectivas incertidumbres aceptadas para verificar el funcionamiento del control de los parámetros ya mencionados [19].

Continuando con la búsqueda de información necesaria para el desarrollo del protocolo, mediante entrevistas al personal de hospital se obtuvo información sobre el



mantenimiento preventivo de las incubadoras neonatales. Dichos mantenimientos se realizan trimestralmente, los cuales se contratan con un tercer que realiza una inspección visual, funcional y de rendimiento. Durante la inspección de rendimiento, se evalúan los parámetros de temperatura y humedad, configurando dichos parámetros en un valor estandarizado en dichos mantenimientos. En el transcurso de una hora se verifica el comportamiento de estas variables, comparando el valor que presenta la incubadora con el valor de dichos parámetros de un dispositivo externo calibrado. Todo este proceso se realiza con base al manual de servicio de las incubadoras.

En cuanto la prueba de descarga, se caracterizó la descarga del prototipo en una curva donde se grafica el voltaje de las dos baterías alcalina AAA de 1.5 V y el tiempo de funcionamiento continuo del prototipo [h], como se muestra en la gráfica 1. Además de esto, en la tabla 3 se presenta las mediciones que el analizador realizó durante el test de batería, el consumo de corriente del prototipo, la capacidad de las baterías y la resistencia en serie equivalente (ESR).



Gráfica 1. Curva de descarga del prototipo.

Parámetro	Valor	Unidades
Consumo de corriente	0,27719192	A
Capacidad de batería	0,08945718	Ah
ESR	0	$\Omega$

Tabla 3. Parámetros medidos con el analizador KEITHLEY 2281S-20-6 Precision DC Supply & Battery Simulator.

Para finalizar y delimitar de mejor manera se presentan los criterios de exclusión e inclusión de las incubadoras en la tabla 4.

Criterios de inclusión	Criterio de exclusión
------------------------	-----------------------

Incubadoras con funcionamiento apropiado según mantenimientos preventivos.	Incubadoras en uso con paciente.
Incubadora que permita comparar los parámetros a estudiar, al menos temperatura y humedad.	Incubadoras pediátricas abiertas o servocontroladas.
Incubadoras con registro sanitario vigente.	Incubadoras dadas de baja por el departamento de ingeniería biomédica

*Ilustración 4. Criterios de inclusión y exclusión de incubadoras para esta investigación.*

Con la información ya expuesta se logró plantear de manera detallada un protocolo para la implementación del prototipo y verificación de su funcionamiento.

## 6. DISCUSIÓN

El prototipo en montaje SMT demostró su funcionamiento mediante la visualización de las mediciones por la interfaz de SigFox, mejorando su practicidad y facilidad de implementación como un dispositivo de medición de parámetros dentro de una incubadora neonatal.

Con la información recolectada, tanto de las incubadoras como de los protocolos del hospital, se pudo determinar el rango y diferentes puntos para realizar una calibración exacta y apropiada para el dispositivo, los cuales se presentan en la tabla 5.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad
Temperatura	23,0	39,0	°C
Humedad	40	95	%
Sonido	20	50	dBA

*Tabla 5. Rangos para la calibración de los parámetros del prototipo.*

La inspección del rendimiento de la incubadora es un protocolo apropiado a seguir para comprobar la exactitud del prototipo. Debido a que se puede comprobar la exactitud de las mediciones del mismo durante el establecimiento de los valores de la incubadora en un periodo de una hora, lo cual es un periodo de tiempo de funcionamiento continuo que el prototipo supera ampliamente. Esto gracias a la prueba de descarga realizada, en la cual se demostró que el prototipo tuvo aproximadamente 200 h de funcionamiento continuo con un voltaje superior al 3.3 V.

Los resultados presentados resultan ser suficientes para la elaboración de un protocolo detallado de la evaluación del prototipo aplicado en incubadoras de un hospital de alta complejidad. Dicho protocolo es presentado como resultado del análisis de la información recolectada durante la elaboración de esta investigación en el Anexo 1.

## 7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con el resultado final de esta investigación se podrán iniciar pruebas de funcionamiento del prototipo en incubadoras de un hospital de alta complejidad, las cuales determinarán la exactitud de las mediciones del prototipo y la incertidumbre respecto a las mediciones teóricas (mediciones de las incubadoras). Para con esos resultados determinar mejoras exactas para el funcionamiento del prototipo, el manejo de la interfaz o la mejora que se necesite realizar.

## 8. CONCLUSIONES

Gracias a la expansión de la industria 4.0, la posibilidad de que la tecnología aporte para mejorar el sector de la salud. En cuanto a los centros de cuidados neonatales, un equipo médico de gran importancia debido a su clasificación de riesgo Clase I, tipo BF y de funcionamiento continuo. Gracias a estas características, se logró justificar la elaboración de un prototipo que permita visualizar los parámetros de temperatura, humedad y sonido de una incubadora de manera remota a través de un sistema IoT.

En esta investigación se exploró la posibilidad de evaluar un prototipo de medición de parámetros de funcionamiento de una incubadora neonatal a través de un sistema IoT en un hospital de alta complejidad en Bogotá, Colombia. Determinado los requerimientos y las necesidades para ello, redactando un protocolo detallado para la implementación que permita demostrar la exactitud, el error de las mediciones y determinar posibles mejoras al prototipo para ser un dispositivo 100% funcional.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] O.M.S., “Nacimientos prematuros,” 2018. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/preterm-birth> (accessed Feb. 24, 2022).
- [2] R. del Río, M. Thió, M. Bosio, J. Figueras, and M. Iriondo, “Predicción de mortalidad en recién nacidos prematuros. Revisión sistemática actualizada,” *Anales de Pediatría*, vol. 93, no. 1, pp. 24–33, 2020, doi: 10.1016/j.anpedi.2019.11.003.
- [3] H. Salinas P. *et al.*, “Impacto económico de la prematurez y las malformaciones congénitas sobre el costo de la atención neonatal,” *Revista chilena de obstetricia y ginecología*, vol. 71, no. 4, pp. 234–238, 2006, doi: 10.4067/S0717-75262006000400003.
- [4] March of Dimes, “Los costos médicos de un bebé prematuro podrían cubrir los costos de una docena de nacimientos sanos,” 2009. [https://nacersano.marchofdimes.org/quienes\\_somos/10531\\_10808.asp](https://nacersano.marchofdimes.org/quienes_somos/10531_10808.asp) (accessed Mar. 07, 2022).
- [5] L. G. Sánchez Bañuelo, J. Pérez Gutiérrez, F. E. Tamariz Velázquez, and M. Delgado Rubio, “Seguridad del neonato hospitalizado. Aproximaciones y propuestas,” *Enfermería Universitaria*, vol. 9, no. 2, pp. 27–36, 2018, doi: 10.22201/eneo.23958421e.2012.2.235.
- [6] M. Brito, D. M. Rocha, and R. Ferreira, “Análisis de los eventos adversos en una unidad de terapia intensiva neonatal como herramienta de gestión de calidad de la atención de la enfermería,” *Enfermería global*, vol. 17, p. 13, 2009, [Online]. Available: <https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=687067f3-2e76-f07f-5ae0-2d3e1b14b67b&documentId=d58d54c3-17bd-3c30-a780-6195f200e9fa>

- [7] L. H. C. Casallas, L. A. García Sánchez, and H. A. López Quintero, "Metrología aplicada a la calibración de incubadora neonatal," *Revista EIA*, vol. 17, no. 34, pp. 1–12, 2020, doi: 10.24050/reia.v17i34.1331.
- [8] Instituto Nacional de Meteorología de Colombia, "Servicio de calibración," 2021. <https://inm.gov.co/web/calibracion-4/> (accessed Mar. 24, 2022).
- [9] O. O. Flores-Cortez and V. I. Rosa, "Monitoreo remoto usando internet de las cosas," *2017 IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII), Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII), 2017 IEEE 37th*. pp. 1–3, 2017. doi: 10.1109/CONCAPAN.2017.8278466.
- [10] A. Quiroz Estrada, G. A. Acosta Amaya, and R. A. Torres Villa, "Diseño de un sistema internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de la presión arterial.," *Revista EIA*, vol. 18, no. 35, pp. 1–15, 2021, doi: 10.24050/reia.v18i35.1474.
- [11] L. J. Ramírez López, "Aplicación del Internet de las Cosas en la salud: caso en la Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica," 2018, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=6489646>
- [12] P. v Baudin *et al.*, "Low cost cloud based remote microscopy for biological sciences," *Internet of Things*, p. 100454, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100454>.
- [13] S. S. Raykar and V. N. Shet, "Design of healthcare system using IoT enabled application," *Materials Today: Proceedings*, vol. 23, pp. 62–67, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.649.
- [14] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," vol. 2.9, pp. 1–65, 2019, [Online]. Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)
- [15] D. G. Palacio and F. A. Manrique Cortes, "Alimentador canino automático." Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería ..., 2017.
- [16] Sigfox, "¿Qué es sigfox?," 2021. <https://sigfox.com.py/que-es-sigfox/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [17] Keithley, "Series 2281S battery simulator and precision DC power supply," *Datasheet*. [https://download.tek.com/datasheet/1KW-60206-0\\_2281S\\_Datasheet\\_050119.pdf](https://download.tek.com/datasheet/1KW-60206-0_2281S_Datasheet_050119.pdf) (accessed Apr. 11, 2022).
- [18] E. M. Pinheiro, R. Guinsburg, M. A. de A. Nabuco, and T. Y. Kakehashi, "Noise at the Neonatal Intensive Care Unit and inside the incubator," *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, vol. 19, no. 5, pp. 1214–1221, 2011, doi: 10.1590/s0104-11692011000500020.
- [19] Atom Medical Corporation, "Atom Infant Incubator Model 101 Service Manual & Parts List," 2015.

## 10. ANEXOS

### 10.1. Anexo 1: Protocolo para evaluación del funcionamiento del prototipo

Gracias a la información recolectada durante un semestre de investigación, se determinó que la mejor manera de implementar una evaluación del funcionamiento de un prototipo de medición de parámetros de funcionamiento de una incubadora neonatal a través de un sistema IoT en un hospital de alta complejidad en Bogotá, Colombia, es siguiendo los pasos expuestos en el presente protocolo.

- 1. Exponer el proyecto en el hospital de alta complejidad.**  
Presentar el proyecto a los coordinadores del área de ingeniería biomédica para aclarar el alcance, duración y requerimientos del mismo.
- 2. Preguntar por el cronograma de mantenimientos preventivos de las incubadoras.**  
Tener conocimiento de los mantenimientos preventivos que se realizarán a las incubadoras seleccionadas.
- 3. Prepara el prototipo.**  
Conectar el prototipo a la red de internet del hospital para garantizar la transmisión y visualización de datos.
- 4. Realizar visitas al hospital.**  
Visitar el hospital acorde a las fechas de mantenimientos preventivos para hacer realizar la evaluación del prototipo con las incubadoras con dichos mantenimientos aprobados. *En este paso es necesario evaluar dos posibilidades.*
  - a. Usar las incubadoras mientras se realizar el mantenimiento preventivo.
  - b. Disponer de incubadoras con un mantenimiento preventivo aprobado con una fecha no mayor a 3 meses de anterioridad a la fecha de realizar la prueba del prototipo.
- 5. Iniciar la prueba.**  
En esta prueba se tendrán dos opciones (**5.a.** o **5.b.**) según el paso anterior que se disponga **4.a.** o **4.b.** respectivamente.
  - a. Alinear las pruebas con los protocolos de los mantenimientos preventivos que se tenga en el hospital.
  - b. Ajustar las pruebas a las inspecciones de rendimiento expuestas en los manuales de servicio.
    - i. Colocar el prototipo de manera estratégica en la incubadora.
    - ii. Ajustar el parámetro de temperatura a 36,0°C.
    - iii. Iniciar la incubadora al tiempo con las mediciones del prototipo.
    - iv. Registrar cada 10 minutos la temperatura medida por la incubadora, en un periodo de 1h que permita a la incubadora llegar a una temperatura estable.
    - v. Para la incubadora.
    - vi. Comparar las mediciones de temperatura del prototipo y de las incubadoras y el registro de ruido del prototipo.
    - vii. Ajustar el parámetro de humedad a 90%.
    - viii. Iniciar la incubadora al tiempo con las mediciones del prototipo.

- ix. Registrar cada 10 minutos la humedad medida por la incubadora, en un periodo de 1h que permita a la incubadora llegar a una humedad estable.
- x. Para la incubadora.
- xi. Comparar las mediciones de humedad del prototipo y de las incubadoras y el registro de ruido del prototipo.

**6. Evaluación de las pruebas.**

Mediante evaluaciones estadísticas, verificar que la evaluación es repetible y demuestra unos resultados no aleatorios.