



LA FORMACIÓN DE INGENIEROS:  
UN COMPROMISO PARA EL  
DESARROLLO Y LA SOSTENIBILIDAD

15 al 18  
DE SEPTIEMBRE

20  
20

[www.acofi.edu.co/eiei2020](http://www.acofi.edu.co/eiei2020)

# **SISTEMA DE MONITOREO REMOTO DE CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES EN LAS SALAS DE CIRUGÍA DE UNA CLÍNICA DE CUARTO NIVEL DE COMPLEJIDAD MEDIANTE EL USO DE INTERNET DE LAS COSAS (IoT)**

**Pedro Antonio Aya Parra, Diego Felipe Castelblanco Angarita, Andrés Eduardo Marroquín Hidalgo, Hernán Alfredo Muñoz Bernal, Juan Fernando Guarín Crispín, Jefferson Sarmiento Rojas, Daniel Alejandro Quiroga Torres**

**Universidad del Rosario  
Bogotá, Colombia**

**José Leonardo Moreno Meneses**

**KERALTY  
Bogotá, Colombia**

## **Resumen**

La regulación de las condiciones ambientales dentro de un quirófano es una prioridad, previniendo factores de riesgo para el paciente, en la mayoría de las instituciones de salud por normatividad requiere un acondicionamiento y supervisión del aire para evitar el transporte de microorganismos. En este trabajo diseñó un sistema de monitoreo remoto de las condiciones ambientales que permite al personal asistencial y de ingeniería visualizar y consultar los datos en tiempo real de porcentaje de presión positiva, temperatura y humedad relativa. El Sistema está basado en el paradigma de internet de las cosas (IoT). La arquitectura utilizada está compuesta por cuatro capas, percepción, transporte, procesamiento y aplicación, las cuales permitieron la instrumentación de los sensores, definir los protocolos de comunicación, gestión de la información y finalmente la visualización y consulta de la información. Como resultado del presente trabajo, se desarrollaron cinco dispositivos los cuales se ubicaron en tres salas de cirugía y otros dos restantes en el pasillo de las salas de cirugía, con el fin de supervisar la presión del aire y otras variables de ambientales de funcionamiento; de la misma forma se implementó un sistema de alarmas y consultas detalladas

para cada una de las salas. En conclusión, se puede decir que el sistema implementado contribuyó al aseguramiento de la calidad sobre las condiciones de salud de los pacientes y de los trabajadores al interior de las salas de cirugía, teniendo en cuenta, los procedimientos realizados en el transcurso de tres semanas como prueba piloto.

**Palabras clave:** sistema de monitoreo; internet de las cosas; seguridad del paciente

### **Abstract**

*The regulation of environmental conditions within an operating room is a priority, preventing risk factors for the patient, in most health institutions, regulations require air conditioning and supervision to avoid the transport of microorganisms. In this paper, a remote monitoring system of environmental conditions is designed, which allows healthcare and engineering personnel to view and consult real-time data on the percentage of positive pressure, temperature, and relative humidity. The System is based on the Internet of Things (IoT) paradigm. The architecture used is made up of four layers, perception, transport, processing, and application, which allowed the instrumentation of the sensors, define the communication protocols, information management and finally, the visualization and consultation of the information. As a result, five devices were developed and were located in three operating rooms and two others in the hall of the operating rooms, in order to monitor air pressure and other operating environmental variables. Likewise, an alarm system and detailed queries were implemented for each of the rooms. In conclusion, the implemented system contributed to quality assurance regarding the health conditions of patients and workers within the operating rooms, considering the procedures carried out over the course of three weeks, such as pilot test.*

**Keywords:** monitoring system; internet of things; patient safety

## **1. Introducción**

La regulación de las condiciones ambientales en una sala de cirugía es fundamental para que el procedimiento se lleve a cabo de manera segura, esto incluye la prevención de factores de riesgo, teniendo en cuenta que el aire es un vehículo de transporte de microorganismos y partículas. Estudios efectuados en EE. UU. indican que anualmente se producen 1.5 millones de infecciones adquiridas en el hospital, las cuales causan 15.000 defunciones, así mismo, contribuyen a la mortalidad de otros 45.000 pacientes (Nuño, 2018). Para garantizar una calidad de aire óptima, se debe contar con un sistema de ventilación que cumpla con los siguientes requisitos: proceso de filtrado riguroso, generación de flujo de aire adecuado y cascada de presiones desde el quirófano hasta el exterior para minimizar la entrada incontrolada de aire desde áreas menos limpias.

Por otro lado, la humedad relativa, proporciona un medio relativamente conductivo para la proliferación de microorganismos, Cuando la humedad relativa del aire aumenta, el agua disponible para éstos incrementa, lo que permite su hidratación y por tanto la activación de muchos de ellos (Hernández, et al., 2009). Así mismo, White, et al. (2019) mencionan que en altos niveles de esta humedad se ha establecido una relación entre ascendente entre los periodos de inducción

del isoflurano (gas anestésico común) y disminución de la eficiencia de eliminación del acrilonitrilo (compuesto de hidrocarburos y nitrilos generado por el humo de la electrocirugía), que puede ser nocivo para el personal médico.

Por otro lado, la temperatura es un factor importante especialmente en procesos quirúrgicos pediátricos, ya que debe permanecer bajo un control constante garantizando que el área previamente acondicionada (sala de cirugía), permanezca a un nivel térmico confortable para que el paciente no corra riesgo de pérdida de calor corporal. De esta manera, al igual que el paciente, el personal médico debe permanecer a una temperatura adecuada, ya que el incremento puede generar transpiraciones corporales y fatiga física lo cual, puede afectar el ambiente quirúrgico y en algunos casos comprometer el éxito del procedimiento (Hernández, *et al.*, 2009).

Adicionalmente y conforme a lo expresado, otra variable a estudiarse es la presión en la sala de cirugía, fundamental para la prevención del traslado de partículas o microorganismos como posibles agentes contaminantes de un área a otra, es decir, estableciendo una escala de presiones diferenciales respecto a la presión exterior entre una sala y otra; de esta manera se puede guiar o establecer el flujo de aire (Testo Argentina S.A., 2020).

Sumado a lo expuesto, el constante crecimiento tecnológico permite que se empleen cada vez más sistemas inteligentes en el ambiente hospitalario; por supuesto, uno de los ejes de la llamada revolución 4.0 que adquiere más fuerza es el internet de las cosas (IoT). El principio fundamental de esta tecnología se basa en conectar objetos cotidianos a Internet mediante dispositivos integrados, permitiendo una comunicación fluida entre personas, procesos y cosas (entiéndase como "cosa" al conjunto sensor-medio de transmisión) (Oracle, s.f.). Estos avances tecnológicos no solo están enfocados a la monitorización de pacientes de forma remota sino, a crear todo un ecosistema de control y supervisión, que permitan garantizar la calidad de la prestación del servicio a los usuarios.

De acuerdo con la problemática presentada y para efectos del presente documento se plantea el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo que evalúe la temperatura, la humedad relativa y la presión positiva en las salas de cirugía de una clínica de cuarto nivel durante un periodo de tres semanas. Lo anterior, permitiendo obtener registros de manera remota, y de esta manera obtener una supervisión práctica, a partir del uso de IoT.

## **2. Metodología**

### **Identificación de las condiciones de operatividad de las salas de cirugía**

Las condiciones de operación del área de cirugía con respecto al funcionamiento de su sistema de climatización se centran en identificar y establecer los criterios y requerimientos de operación y funcionamiento del sistema, para ello se seleccionaron tres salas de cirugía como prueba piloto; este proceso se realizó en tres fases:

*Reconocimiento del área:* exploración detallada de la infraestructura y condiciones de operatividad de las salas de cirugía.

*Contacto con el personal:* obtención de información técnica de los equipos de climatización del área.

*Apoyo del departamento de Ingeniería Biomédica:* solicitar información acerca de protocolos de control y monitoreo actuales.

## Requerimientos de diseño del sistema de monitorización

El desarrollo del sistema de monitoreo se alinea a las necesidades funcionales y técnicas de un entorno clínico, de tal manera, que se definieron los requerimientos del sistema, entre los que se contempla la arquitectura, instrumentación, análisis de validación y confiabilidad, transmisión y manipulación de la información, almacenamiento e interfaz de consulta

## Arquitectura

Partiendo de los requerimientos mencionados y con base IoT, se diseñó una arquitectura de tipo distribuida, la cual se caracteriza por los sensores y actuadores estar conectados directamente al servidor o la nube si un dispositivo intermediario, La arquitectura se compone por 4 capas que se encargan de cumplir cada una de las subfunciones en el sistema. A continuación, en la figura 1 se presenta el esquema general de capas.

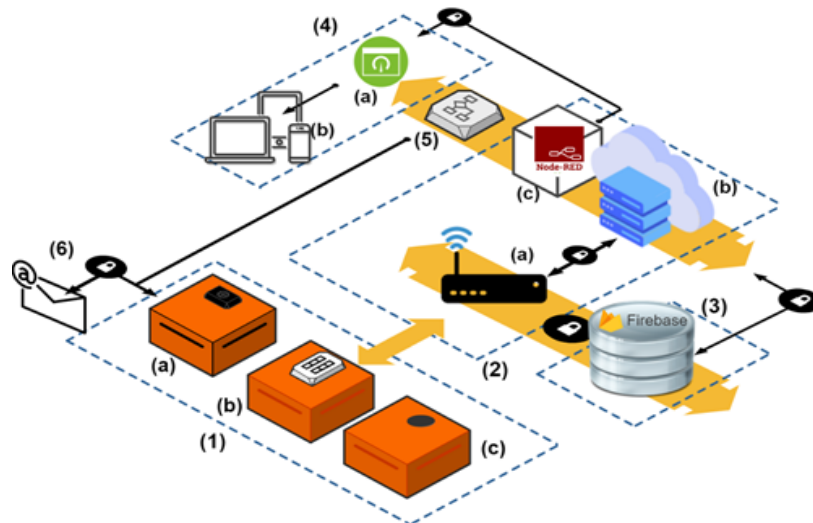


Figura 1. Esquema de capas del sistema. Instrumentación (1), comunicación (2), almacenamiento (3) y visualización (4).

## Instrumentación

El sistema estaba compuesto por cinco dispositivos (figura 1-1), tres (3) de los cuales fueron ubicados cada uno en una sala de cirugía, otro (1) en el pasillo exterior, esto con el fin de tomar los valores de presión registrados por este dispositivo como referencia. Finalmente se instaló el

dispositivo de alarma en el departamento de ingeniería biomédica, en un lugar visible y de fácil manipulación.

*Interno sala:* Cumple la función de registro y envío de los datos correspondientes a temperatura, humedad y presión relativa al interior de la sala de cirugía.

*Externo sala:* Cumple la función de registrar y enviar los datos correspondientes a temperatura y presión relativa en las áreas adyacentes a los quirófanos.

*Alarma:* Se encarga de recibir las notificaciones generadas por el sistema y alertar de forma visual y sonora. Este dispositivo cuenta con un mecanismo de interrupción de las alertas visuales y sonoras que consiste en acercar algún objeto a la tapa frontal, sin necesidad de hacer contacto.

## **Análisis de validación y confiabilidad**

Los sensores de temperatura y humedad que se emplearon en el sistema fueron sometidos a un proceso de calibración con el apoyo de un laboratorio de Metrología y Calibración Biomédica que se encuentra en proceso de acreditación por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC). Según los resultados obtenidos, se realizó la corrección de medida de cada sensor, de esta forma se garantizó que la temperatura y la humedad relativa registrada en el sistema fuera la correcta durante todo el periodo de la prueba piloto.

## **Transmisión y manipulación de datos**

El envío de la información se realizó a través del protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), el cual se encarga de transferir la información de los sensores a un servidor en la nube a través de un puerto internet, estos datos son organizados y enviados como “mensajes” en formato JSON<sup>1</sup>, indicado para este protocolo de envío de información. Un bróker<sup>2</sup> propio del servidor permite la recepción y registro de estos mensajes. Los datos recibidos son registrados y manipulados utilizando la herramienta Node Red de desarrollo de sistemas IoT, donde se hace la conversión para habilitar su operación matemática y así obtener el valor del diferencial de presión.

## **Almacenamiento**

Para almacenar la información recopilada durante el periodo de implementación del sistema, fue requerida una base de datos que organizara y permitiera la consulta o modificación de cada registro guardado. Considerando las características ofrecidas por cada uno de los tipos de bases de datos (relacionales y no relacionales), se identificaron los requerimientos del sistema y la información que será almacenada; al tratarse de información que requiere ser guardada en tiempo real, debe estar segura, fácil de consultar y disponible para realizar modificaciones en su estructura. En ese sentido, se considera como opción más viable la base de datos no relacional, albergada en un servidor de Google, llamada Firebase RealTime DataBase<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Siglas de JavaScript Object Nation, formato de texto sencillo para intercambio de datos.

<sup>2</sup> Intermediario de mensajería entre publicadores y suscriptores IoT.

<sup>3</sup> Base de datos que almacena en tiempo real la información organizada.

### 3. Resultados

#### Los dispositivos



Figura 2. Dispositivos de registro interno; (a) temperatura y humedad y (b) registro externo presión.

En la figura 2, 3 y 4 se evidencia los dispositivos internos instalados dentro de las salas de cirugía, al igual que el dispositivo externo ubicado en el pasillo y la alarma en las oficinas del departamento de Ingeniería Biomédica.

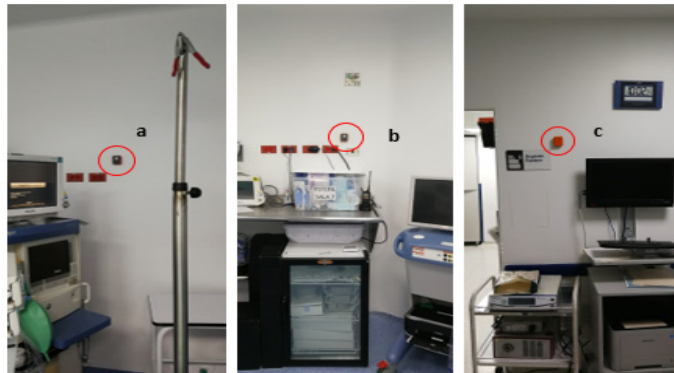


Figura 3. Dispositivos instalados: sala 2 (a), sala 7 (b) y exterior (c).



Figura 4. Dispositivos instalados: sala 7 (a) y alarma (b).

#### Alarmas y notificaciones

##### Notificaciones

El sistema cuenta con una serie de notificaciones aparte del dispositivo de alarma. En la figura 5 se muestran algunos ejemplos de las notificaciones vía mensaje de texto y correo electrónico; la notificación visual está acompañada de una alarma sonora y visual por medio de la interfaz gráfica; estas se generan cuando el sistema detecta un valor inusual en cualquiera de las variables objeto de estudio.

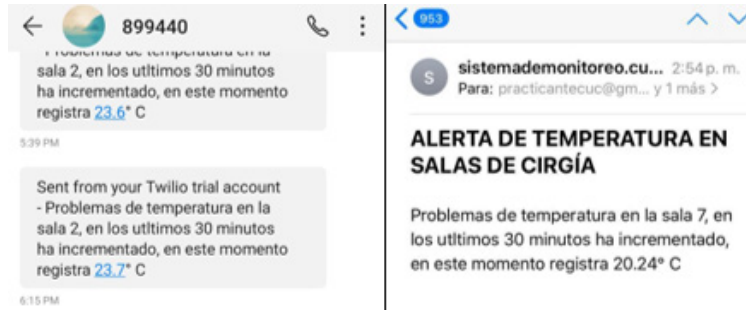


Figura 5. Notificaciones vía mensaje de texto y correo electrónico.

### Pruebas de desempeño

De acuerdo con los resultados para cada sala, se realizó la tabla 1, con el fin de comparar la media y dispersión de los datos de temperatura y humedad relativa medidos por cada método.

Tabla 1. Resultados análisis de las variables temperatura y humedad

Sala de Cirugía	Temperatura (°C)		Humedad Relativa (%)	
	Media ( $\pm$ SD <sup>4</sup> )		Media ( $\pm$ SD)	
	Termohigrometro	Sistema IoT	Termohigrometro	Sistema IoT
Sala 2	20.78 ( $\pm$ 0.096)	20.67 ( $\pm$ 0.152)	43.79 ( $\pm$ 0.419)	54.41 ( $\pm$ 0.791)
Sala 7	18.45 ( $\pm$ 0.051)	18.02 ( $\pm$ 0.103)	46.32 ( $\pm$ 0.478)	50.46 ( $\pm$ 0.747)
Sala 8	19.27 ( $\pm$ 0.138)	18.66 ( $\pm$ 0.103)	39.05 ( $\pm$ 0.705)	56.50 ( $\pm$ 0.437)

Adicionalmente, se generaron para cada una de salas una gráfica correspondiente con el fin de comparar las mediciones utilizando los dos métodos de medición, en la figura 6 se muestra un ejemplo para la sala de cirugía 7.

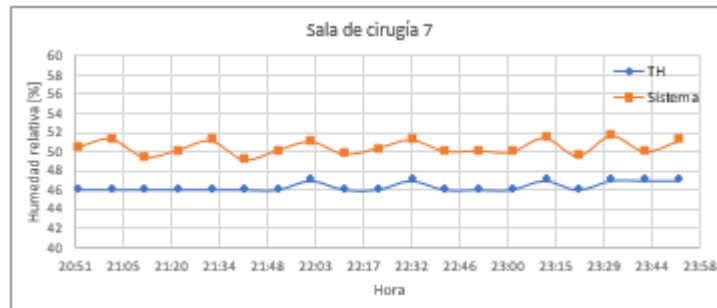


Figura 6. Prueba de desempeño comparando métodos.

El porcentaje de presión positiva, expresado así para representar la proporción de presión relativa que hay de más en el interior de la sala, con respecto a las zonas adyacentes; presenta un comportamiento para el primer escenario (horario de operatividad activa de las salas), al igual, el comportamiento del porcentaje de presión positiva para el segundo escenario (horario de inactividad de las salas) para la sala de cirugía 7.

<sup>4</sup> SD: Desviación estandar

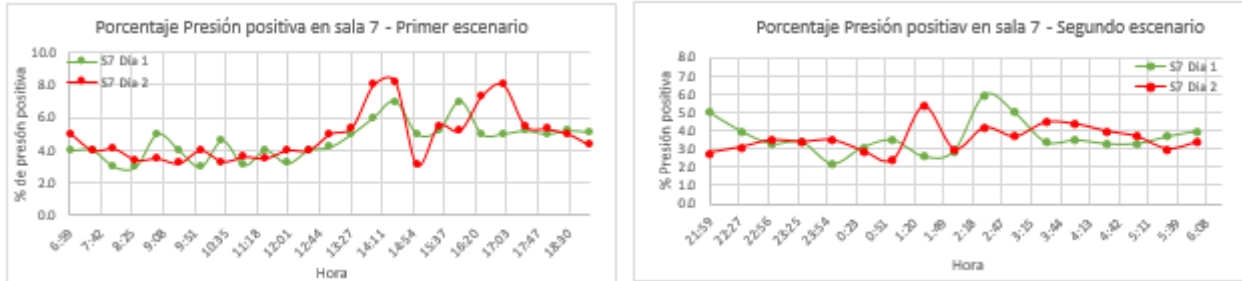


Figura 7. Porcentaje de presión positiva para la sala 7 durante los dos escenarios.

#### 4. Conclusiones

Teniendo en cuenta las pruebas de desempeño del sistema, comparándolo con el método de medición actual en la institución, se observa que el sistema es capaz de detectar eficientemente los cambios en las variables de temperatura y humedad. Con respecto a la presión positiva se encontró una relación con los procedimientos realizados y su programación, en particular se observa en el día 2 del primer escenario para la sala 7 (figura 7) donde tuvo lugar un procedimiento de larga duración el cual inicio a las 7:30 am y finalizo a las 2:20 pm, se observa una caída del porcentaje de presión positiva probablemente por la apertura de puertas para traslado del paciente al finalizar la intervención. La interfaz de monitoreo y consultas permiten al personal de ingeniería ejercer un control riguroso de las condiciones ambientales dentro de los quirófanos, así mismo se convierte en una herramienta de sustento frente a algún evento adverso que pudiera presentarse a causa de anomalías en estas variables.

#### 5. Referencias

- D. Nuño. (2018). Control del sistema de ventilación de un quirófano en periodos transitorios.
- E. White, C. Raillard, A. Subrenat and V. Hequet. (2019). Influence of environmental parameters on the photocatalytic oxidation efficiency of acrylonitrile and isoflurane; two operating room pollutant.
- M. Hernández y S. León. (2009) Determinación de la calidad del aire extramural e intramural en la sala de cirugía del Hospital el Tunal de la ciudad de Bogotá para el desarrollo de mecanismos de control y minimización de riesgo causado por microorganismos potencialmente nosocomiales.
- Oracle. (s.f.). ¿Qué es Internet of Things (IoT)? Consultado el 16 de febrero del 2020 en: <https://www.oracle.com/co/internet-of-things/what-is-iot.html>.
- Testo Argentina S.A. (2020). Medición de presión en salas limpias. Consultado el 08 de febrero del 2020 en: <https://www.testo.com/es-AR/aplicacion/medicion-de-presion-en-salas-limpias>.



## Sobre los autores

- **Pedro Antonio Aya-Parra:** Ingeniero Biomédico, Magíster en Ingeniería Electrónica. Instructor de prácticas del programa de Ingeniería Biomédica, Universidad del Rosario. pedro.aya@urosario.edu.co
- **Diego Felipe Castelblanco Angarita:** Estudiante de Ingeniería Biomédica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y Universidad del Rosario. diego.castelblanco-a@mail.escuelaing.edu.co
- **Andrés Eduardo Marroquín Hidalgo:** Estudiante de Ingeniería Biomédica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y Universidad del Rosario. andres.marroquin-h@mail.escuelaing.edu.co
- **Hernán Alfredo Muñoz-Bernal:** Diseñador Mecánico y Tecnólogo en Automatización, Auxiliar de Laboratorio de Ingeniería Clínica del programa de Ingeniería Biomédica, Universidad del Rosario. hernan.bernal@urosario.edu.co
- **Juan Fernando Guarín Crispín:** Tecnólogo en mantenimiento de equipos biomédicos, Auxiliar del Laboratorio de Bioinstrumentación, Universidad del Rosario. Juanf.guarin@urosario.edu.co
- **José Leonardo Moreno Meneses:** Ingeniero Biomédico, Magíster en Diseño, Gestión y Dirección de Proyectos. Subgerente de área de Ingeniería Biomédica, Keralty, Vicepresidencia de Infraestructura. jlmoreno@colsanitas.com.
- **Jefferson Sarmiento-Rojas:** Ingeniero electrónico, Magíster en Ingeniería Electrónica. Instructor de prácticas del programa de Ingeniería Biomédica, Universidad del Rosario. jefferson.sarmiento@urosario.edu.co
- **Daniel Alejandro Quiroga-Torres:** Ingeniero Biomédico y Electrónico. Profesor Auxiliar de Carrera del programa de Ingeniería Biomédica, Universidad del Rosario. daniel.quiroga@urosario.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2020 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)