

Implementación de tecnologías libres y sensores remotos para un biobanco: el desafío de producir a bajo costo

María L. Luna-Gonzalez⁽¹⁾, Silvia M. Becerra-Bayona⁽¹⁾, Norma Serrano-Diaz^(1,3) y René A. Lobo-Quintero⁽²⁾

(1) Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Bucaramanga. Transversal 157 No. 19 – 55, Floridablanca-Colombia (correo-e: mluna@unab.edu.co; sbecerra521@unab.edu.co)

(2) Facultad de Ingenierías, Universidad Autónoma de Bucaramanga, Avenida 42 No. 48 – 112, Bucaramanga-Colombia (correo-e: rlobo@unab.edu.co)

(3) Fundación Cardiovascular de Colombia, Valle de Menzulí Km 7 Autopista Bucaramanga-Piedecuesta, Bucaramanga-Colombia (correo-e: normaserrano@fcv.org)

Recibido Sep. 23, 2019; Aceptado Nov. 14, 2019; Versión final Ene. 14, 2020, Publicado Abr. 2020

Resumen

El objetivo de esta investigación fue diseñar, desarrollar e implementar un sistema de monitoreo remoto para biobancos con fines de investigación utilizando tecnologías del internet de las cosas, sensores digitales y analógicos, como también microcontroladores y comunicación inalámbrica. Los biobancos son establecimientos sin ánimo de lucro, que gestionan colecciones de muestras biológicas humanas con fines diagnósticos o de investigación biomédica. Dada la gran relevancia del material resguardado, la seguridad, integridad y correcto almacenamiento son factores críticos y de trascendental importancia para garantizar el éxito de las investigaciones basadas en biobancos. Nuestro desafío consistió en acoplar exitosamente sensores de temperatura, humedad, voltaje, fuerza y sonido en una sola unidad, e implementar un sistema de software con un visor web y un módulo de alertas en tiempo real. Este sistema permite monitorear un biobanco, garantizando la calidad del material biológico almacenado sin incrementar sustancialmente los costos de implementación y funcionamiento.

Palabras clave: biobanco; sistema de monitoreo; material biológico; calidad; tecnologías libres

Implementation of open-source technology and remote sensors for a biobank: the challenge of producing at low cost

Abstract

The goal of this research was to design, develop and implement a remote monitoring system for research biobanks using internet of things and analog and digital sensors, as well as micro controllers with wireless connection. Biobanks are non-profit establishments, that manage collections of biological samples for diagnostic or biomedical research purposes. Given the relevance of the stored material, not only the safety, but also the integrity and correct storage of this biological material are critical factors to guarantee the accuracy of all the investigations based on biobanks. Our challenge was to successfully couple sensors for measuring temperature, humidity, voltage, strength and sound into a single unit and implement both a software with a web viewer and a real-time alarm module. This remote system allows to monitor a biobank to assure the quality of the stored biological material without substantially increasing implementation and operation cost.

Keywords: biobank; monitoring system; biological material; quality; free technologies

INTRODUCCIÓN

Los biobancos nacieron al solicitar a las personas donar sus muestras biológicas y datos con fines diagnósticos o de investigación sin ánimo de lucro (Simeon-Dubach y Watson, 2014), y se convirtieron en unidades técnicas que cumplen con criterios de calidad, orden y destino (Vaught, 2016; Samper, 2018). Inicialmente lo importante fue la cantidad de muestras y hace casi una década se describían más de 10.000 biobancos, de ellos 2.000 con entre 200 y 1000 muestras cada uno (Zika et al., 2011). Posteriormente se exaltó la calidad del material biológico humano almacenado (MBA), indispensable para la reproducibilidad de la investigación basada en biobancos; y en una tercera etapa, se hizo énfasis en la búsqueda de mecanismos para mejorar las donaciones y el acceso más amplio a las muestras biológicas (Simeon-Dubach y Watson, 2014), lo que influye plenamente en las dos características anteriores: cantidad y calidad del material gestionado.

El material biológico humano (MBH) asociado a diversos datos sociodemográficos y clínicos de los donantes, se ha transformado en un elemento muy importante y valioso para el estudio a gran escala de enfermedades comunes, además de convertirse en una herramienta fundamental en el ámbito de la investigación biomédica. El MBA, proveniente de: i) proyectos de investigación específicos, ii) remanentes de estudios previos, iii) muestras donadas a biobancos con fines de investigación, y iv) productos de evaluaciones clínicas a grupos de pacientes, se conserva siguiendo lineamientos éticos y con finalidades científicas, que buscan aportar al entendimiento de las patologías que afectan al ser humano. Por consiguiente, para apoyar y potenciar la investigación biomédica de excelencia, se han constituido los biobancos de MBH teniendo en consideración criterios que aseguren la calidad e idoneidad de las muestras biológicas obtenidas y almacenadas, y respetando, en todo momento, los requisitos éticos y legales que garantizan los derechos de los ciudadanos (Somoza y Tora, 2009; Domenech y Cal, 2014).

La mayoría de los biobancos han estado afiliados a instituciones académicas (Henderson et al., 2013), que les compromete con su financiación y gobernanza para asegurar la infraestructura física y criopreservación (Yuzbasioglu y Ozguc, 2013), factores importantes que, junto con prácticas efectivas, puedan garantizar la sostenibilidad del biobanco y el control y alta calidad del MBA para ser fuente de la investigación genómica y la medicina de precisión (Rao et al., 2019; Rush et al, 2015). Por consiguiente, la seguridad, integridad y correcto almacenamiento del MBA, se consideran factores críticos y de trascendental importancia para garantizar el éxito de todas las investigaciones basadas en biobancos (Karimi-Busheri, 2015). Como resultado, las condiciones de almacenamiento del MBA requieren de un monitoreo constante dado que fluctuaciones en parámetros como temperatura, humedad y tensión eléctrica, podrían poner en riesgo la calidad del MBH, disminuyendo su valor científico.

De acuerdo a la Sociedad Internacional para Repositorios Biológicos y Ambientales ISBER, para garantizar la seguridad de las muestras, se deben cumplir una serie de requisitos referentes a su almacenamiento (Campbell et al., 2012). Entre estos, se destaca la temperatura y ventilación ambiental, la cual no debe exceder los 22°C, con el fin de prevenir daños en los equipos de refrigeración (ultracongeladores) donde se mantiene el MBA. En el caso que los ultracongeladores se encuentren localizados en lugares cerrados, en donde pueda haber reducción del nivel de oxígeno, también se aconseja monitorear estos niveles, e inspeccionar la humedad relativa ambiental, para asegurar un valor entre 40-60%. Asimismo, se debe tener control de la temperatura de conservación del MBA, por lo que ISBER recomienda mantener a -20°C el mantenimiento de muestras de ADN y a -80°C para periodos prolongados de almacenamiento; condiciones de almacenamiento que pueden variar dependiendo del tipo de muestra y la duración de conservación. La temperatura de los ultracongeladores debe ser constante, por tanto, se requiere un flujo eléctrico constante, y en caso de fallas, tener un respaldo tal como una Unidad Supletora de Energía (UPS) o una planta eléctrica. Igualmente, se sugiere contar con un sistema de prevención, donde se generen alertas en caso de cualquier eventualidad que afecte la calidad del MBA (Vaught, 2012; McQueen et al, 2014). Por todo lo anterior, se hace indispensable contar con sistemas de monitoreo en tiempo real para proteger el MBA en los biobancos con fines de investigación.

En el mercado se pueden encontrar diversas soluciones de monitoreo de diferentes tipos; desde simples sensores de temperatura, hasta completos sistemas de monitoreo inalámbrico capaces de interconectar múltiples tipos de sensores en varios lugares simultáneamente, que, a su vez, mantienen registro de todas las mediciones y actividades. En particular, *Sensaphone Remote monitoring Solutions* es una de las compañías líderes con 30 años en el mercado brindando soluciones a más de 400.000 sistemas. Cuentan con soluciones especializadas para monitoreo de muestras biológicas que registran temperatura, humedad, fallas eléctricas, inundación, acceso, datos que se registran en la nube que pueden ser consultados vía web. Esta empresa no cuenta con representantes de ventas en Colombia. Del mismo modo, *Grid Connect* ofrece hardware para monitoreo de temperatura, humedad y movimiento que se pueden interconectar inalámbricamente, y controlar vía web; no obstante, utilizan sensores comerciales que no pueden registrar

temperaturas menores a -40°C . Otras empresas especializadas en sistemas de monitoreo para ultracongeladores son *ITWatchDogs* y *Moviltrack*, ofrecen sensores analógicos e inalámbricos, junto con el almacenamiento de los registros en bases de datos. Como se describe, a pesar de contar en el mercado con diversas alternativas para el monitoreo, éstas tienen particularidades tales como control independiente para cada variable, o sistemas limitados o integrados a necesidad, con costos de hardware elevados, e incremento en la inversión económica, por servicios de monitoreo y alarmas adicionales con pagos mensuales o anualidades.

Otro de los factores críticos para garantizar la sostenibilidad y calidad del MBA, son los recursos y la financiación limitada que existe, principalmente en los biobancos de países de bajos y medianos ingresos (Soo et al., 2017). Una posible solución a esta necesidad de monitoreo es el uso del internet de las cosas (IoT), definido en el año 2012 por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, como una infraestructura mundial que utiliza las tecnologías de la información y la comunicación, para ofrecer servicios avanzados de interconexión física y virtual, con lo cual se comunican cosas y personas a través de internet. La IoT soporta la convergencia de diversas tecnologías, la captura autónoma de datos, la transferencia de eventos, la conectividad de red y la interoperabilidad; así, entre las aplicaciones más frecuentes para IoT, se encuentra el monitoreo remoto, utilizado para aplicaciones en el hogar hasta aplicaciones para la industria, con beneficios como bajo costo, composición flexible e instalación favorable (Di Gennaro et al., 2014; González et al., 2014; Abba et al., 2019; Vargas et al., 2019).

Una de las características más importantes de la IoT ha sido la comunicación máquina-máquina (M2M), en la cual todos los dispositivos involucrados pueden enviar mensajes entre sí, sin necesidad de intervención humana y que puede ser implementada mediante hardware libre. Arduino, Raspberry Pi y Gobetwino, han sido utilizados para recopilar datos de temperatura y humedad, y la emisión de alertas en caso de eventos (Bitella et al., 2014; Castro, 2016; Muñoz, 2019). Con éxito en los resultados, el uso de sensores de bajo costo para la inspección de diversas variables ha sido utilizado en proyectos de monitoreo remoto (Albaladejo et al., 2012; Parra et al., 2018; Poma et al., 2019).

La evolución del enfoque de diseño a la tecnología web llevó a la IoT a la interconexión a través de ésta y un siguiente enfoque hacia los objetos sociales, mediante el uso de la semántica y la nube de cosas, todo bajo estándares, para integrar objetos de la vida cotidiana que contengan dispositivos integrados (Atzori et al., 2017). Por tanto, el objetivo de esta investigación fue planear, diseñar y desarrollar un sistema de monitoreo remoto (SMR) para biobancos por medio de tecnologías libres para sensores de temperatura, humedad, y tensiones eléctricas. Adicionalmente, generar alertas en tiempo real ante eventos adversos en el sistema de almacenamiento, reportando a los responsables por diversos medios tales como correo electrónico, mensajes de texto y notificaciones push, según sea el tipo de alerta. Este sistema de monitoreo aportará a los estándares técnico-científicos planteados para los biobancos con fines de investigación.

METODOLOGIA

El diseño y desarrollo del SMR para biobancos con fines de investigación, ha tomado como referencia el modelo de desarrollo en V, variante del clásico modelo de desarrollo de la cascada, una vez que generado el código se ejecutaron pruebas que validaron cada una de las etapas preliminares (Pressman, 2005). Se llevó a cabo en cuatro etapas hasta su aceptación e implementación en el Biobanco del Programa CARDIECOL- Conocimiento y Acción para Reducir la Dimensión de la Enfermedad Cardiovascular en Colombia y el Biobanco de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Autónoma de Bucaramanga – UNAB, ambos bajo gestión del Laboratorio de Genética y Biología Molecular de la universidad.

Modelado de requerimientos

Para esta etapa, hizo la evaluación de requerimientos funcionales y no funcionales, mediante la revisión de los estándares de calidad para biobancos (Campbell et al., 2012), se realizaron entrevistas con el coordinador y personal de apoyo del biobanco, y el reconocimiento de la infraestructura física donde están ubicados los ultracongeladores que almacenan el MBA. Como resultado se reconocieron las condiciones ambientales y físicas óptimas para un biobanco.

Diseño de la arquitectura

En esta etapa se hizo la selección y ensamblaje del hardware y sensores para el sistema de monitoreo remoto, iniciando con una revisión del hardware libre capaz de sensar las variables críticas: condiciones de temperatura extrema (-80°C) y apertura de puertas de los ultracongeladores, de temperatura y humedad ambiental, e inundación y alarmas de sonido. A continuación, se planteó como hardware libre la placa Arduino YUN para recibir todos los datos de los sensores y, con su capacidad de conectarse a internet, enviarlos a un

servidor central. Los sensores empleados fueron: sensor para bajas temperaturas (termocupla), sensor de presión, sensor de tensión de entrada, sensor de humedad y temperatura externa, sensor de sonido y sensor de inundación. En cuanto a la arquitectura del sistema de información, se buscó registrar los datos generados por los sensores, guardar un histórico de la temperatura y permitir su visualización en ambiente web. Esta etapa se llevó a cabo mediante: 1) diseño del modelo de base de datos relacional y 2) diseño de arquitectura cliente-servidor a usar,

Diseño de los componentes y Generación de Código

Para el componente de hardware, una vez definidos los sensores y el hardware libre, los sensores fueron ensamblados en cada uno de los pines correspondientes y se conectaron mediante código de programación (librerías). En cuanto al componente de software, se realizó: 1) el diseño de la interfaz gráfica del sistema, 2) la implementación de las clases para la interconexión entre cliente y servidor y 3) implementación de la interfaz gráfica que presenta los datos en tiempo real. Un tercer componente estuvo definido por el diseño del sistema de alertas. El sistema de alertas buscó monitorear las diferentes condiciones en estudio, para que en situaciones de discrepancia de rangos de valores ó de condición crítica, almacenara electrónicamente el conjunto de datos en una base, y enviar avisos en tiempo real mediante notificaciones a celular por mensajes de texto y correos electrónicos a los perfiles definidos para recibir la alerta correspondiente.

RESULTADOS

El objetivo de nuestro proyecto fue diseñar e implementar un sistema de monitoreo constante y preciso para la temperatura de ultracongeladores, y el registro histórico respectivo de los datos en un servidor. Asimismo, se diseñó un sistema de información en función de los requerimientos funcionales, un modelo de base de datos, y una arquitectura web, donde se implementó la plataforma para la visualización de los datos. Similarmente, se incorporó un sistema de alertas que se activa al presentarse cambios o alteraciones de las variables críticas de los ultracongeladores que almacenan el MBH y del biobanco.

Requerimientos funcionales y no funcionales

De acuerdo con los estándares reconocidos por la ISBER, se establecieron las variables fundamento del SMR de la siguiente forma: 1) *Del espacio físico donde se encuentra el biobanco*: i) temperatura y humedad ambiental, ii) inundación y 2) *De los ultracongeladores*: iii) tensión eléctrica de entrada, iv) temperatura interna, v) presión de las puertas como indicador de cierre total, y vi) detección de sonido de alarmas emitidas por los equipos. Se identificó la necesidad de implementar ocho equipos de monitoreo para igual cantidad de ultracongeladores del biobanco. Posteriormente, se realizó el análisis de la infraestructura física en donde estaría ubicado el sistema con el fin de buscar interferencias inalámbricas y garantizar el buen funcionamiento del mismo.

En cuanto a los requerimientos no funcionales, se estableció: i) una operación simultánea de cinco usuarios por ultracongelador, ii) los datos modificados en la base de datos deben estar disponibles para todos los usuarios en máximo 10 segundos, iii) los permisos de acceso estarán a cargo solo del administrador del sistema y iv) el sistema debe tener una disponibilidad de 24/7. Es importante resaltar que el seguimiento de las variables y la disponibilidad del sistema permitirá cumplir las recomendaciones de buenas prácticas internacionales y por tanto la proyección de servicios que se puedan prestar a terceros, con el cumplimiento de las condiciones de infraestructura adecuada que permite garantizar alta calidad para el MBA (Campbell et al., 2012).

Selección y ensamblaje del hardware y sensores para el sistema de monitoreo remoto

Se selecciona como hardware libre la plataforma de prototipado de código abierto Arduino. Todo el sistema fue dispuesto de manera que las fuentes de alimentación fuesen de fácil conexión o desconexión; los sensores del sistema requieren una instalación externa, por lo tanto, estos también fueron acoplados de manera que pudiesen ser conectados o desconectados de manera práctica (Figura 1). En el caso de los sensores de temperatura y humedad ambiental, se utilizó un *sensor DHT22 con baqueta o placa de conexiones* y sus tres pines (alimentación, señal y tierra) tuvieron articulación con alimentación de 5v y conexión directa al punto correspondiente en la placa microcontroladora, teniendo en cuenta la polaridad específica del sensor. La ubicación del sensor ha sido externa a la caja de monitoreo (CM), en la pared lateral de la misma. Ahora bien, para su ubicación en cuánto al área física, se ha recomendado proximidad al área central del biobanco, dada la ubicación del sistema de aire acondicionado del lugar. Este sensor da como salida dos variables independientes asignadas como *h* y *temperature*, en el monitor serial directo del software estas variables están escaladas en porcentaje de humedad relativa y grados centígrados, respectivamente.

Otra de las variables a monitorear es la ocurrencia de inundación, para lo cual se utilizó un elemento genérico de *sensor de goteo o módulo de goteo o inundación para Arduino* más un *convertor de corriente* que acompaña su función; este elemento convertor de corriente se dejó fijo en el circuito de amplificación. El sensor funciona con una alimentación entre 5V y 12V, no posee una polaridad específica y se conectará de manera externa en la pared lateral de la CM. La función del sensor es percibir si existen fugas o filtraciones de agua, por lo tanto, se debe ubicar en la parte inferior del área física del biobanco. Adicionalmente, en el caso que las condiciones del área obliguen una superposición del aire acondicionado con un ultracongelador, este sensor se puede ubicar en la parte superior del equipo ultracongelador acostado o de manera horizontal. La lectura de este sensor se asigna a una variable llamada *inun*, con un rango de valores entre 1023 y 0, el máximo valor demuestra que está seco.

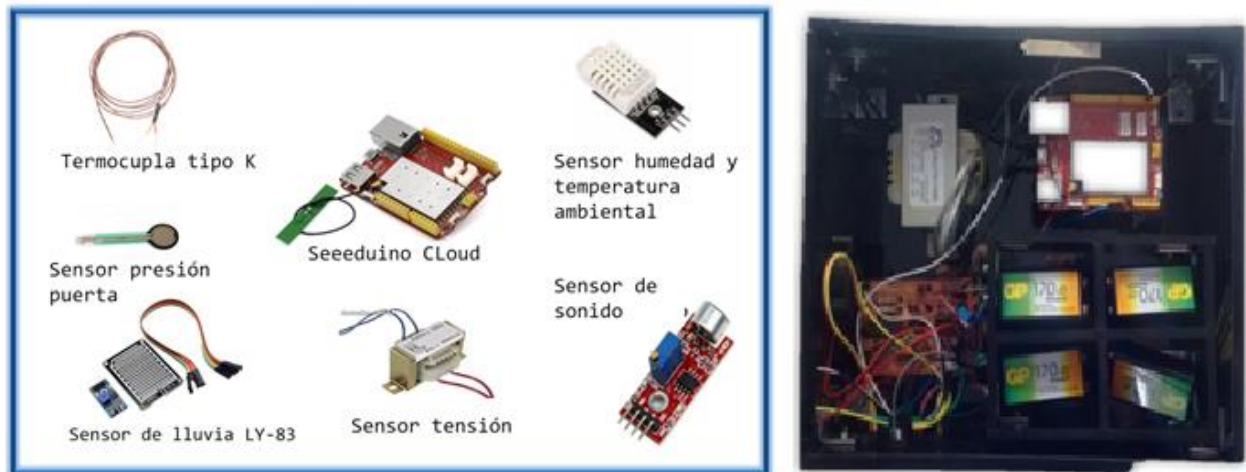


Fig. 1: Sensores empleados y caja de ensamble del sistema de monitoreo remoto para biobancos con fines de investigación.

En relación con los ultracongeladores, en primer término, para el monitoreo de la tensión eléctrica de entrada a los equipos no fue instalado un sensor particular que realice esta función, se utilizó una reducción de potencia y transformación en señal como función de sensado de tensión de la red de alimentación de corriente alterna (AC), tensión en la línea o red de voltaje de 120V o 220V, según el equipo. La primera parte de reducción de voltaje se hizo con un *transformador de voltaje reductor de 120V a 9V* de uso comercial (se puede hallar solicitando la reducción a 9V con una salida de 1 ampere). La segunda etapa está constituida por tres elementos: *un puente rectificador*, *un amplificador operacional LM324* y *un par de resistencias*, que convierten la medida en señal de corriente eléctrica continua (DC) y posterior reducción para retransmisión a la placa microcontroladora. Este sistema requiere alto grado de atención debido a que, de no ser realizado correctamente el montaje y conexión, se puede comprometer la integridad de la placa microcontroladora. Estos cables no tienen una polaridad específica por lo cual no requieren una secuencia o sentido especial en la CM, no obstante, se advierte conectar primero estos puntos y luego conectar el cabezal de la red eléctrica. La lectura de sensado del voltaje AC fue asignada a la variable *vol*, que para una red eléctrica de 120V, tendrá un rango de 100V-150V y para una red de 220V, estará entre 200V-250V.

Con respecto al sensor de temperatura interna de los ultracongeladores, se empleó una *termocupla tipo K con cable desnudo* (medición de temperaturas entre -270 °C y 1372 °C), con cables de conexión recubiertos de color rojo (positivo) y color amarillo (negativo) y una alimentación de 12V. Para obtener una medición correcta se debe aparejar, según su polaridad, en el primer puerto de conexión en la cara lateral derecha de la CM. El sensor registra la variable de salida *termo*, con un valor numérico con un decimal, que representa la temperatura medida dentro del ultracongelador. El sensor debe ubicarse en un punto intermedio dentro del ultracongelador, con el fin de registrar una temperatura homogénea y evitar márgenes innecesarios de error.

El cierre total de la puerta de los ultracongeladores se midió a través de un *sensor de presión al contacto o sensor de fuerza* (entre 0.2 y 20N), elemento análogo denominado resistencia sensible a la fuerza de escala 0.6 inch; con 2 puntos para conexión (positivo y negativo) funciona con alimentación de 5V a su conector positivo y el negativo a tierra pasando por una resistencia no mayor a 1kohm. Con una cara y un reverso, y la cara expuesta a la fuerza/presión de la puerta, transmite la señal escalada a la placa microcontroladora, que interpreta la señal y la retransmite como un valor específico asignado a la variable *presión* como un número entero entre 0 y 1023. Este sensor debe ser conectado respetando la convención de colores establecida y en el orden indicado, de lo contrario su medición será errónea o nula.

En relación con el sensor de sonido, los ultracongeladores cuentan con una función implementada directamente desde fábrica, por medio de la cual se activa una alarma sonora, ante incrementos de temperatura interna o por apertura prolongada de la puerta. En este caso se utilizó un micrófono, *sensor de sonido análogo gravity DFR0034* para el reconocimiento del sonido de estas alarmas. El sensor tiene tres terminales (positivo, señal y tierra o negativo), debe recibir alimentación de 5V y conectarse directamente entre el pin de salida de señal y el pin de conexión en la placa microcontroladora. Asimismo, la ubicación del micrófono debe ser lo más cercano posible a la salida del sonido de alarma del ultracongelador, que regularmente se halla próximo al panel de control de los equipos, por tanto, este es uno de los sensores que puede ser personalizado de acuerdo al modelo del ultracongelador. La medición del micrófono fue asignada a la variable de salida *micro* y su lectura corresponde a un número entero entre 0 y 1023.

Todos los sensores se conectaron a microcontroladores Arduino (uno por cada ultracongelador) con los cuales se creó una red inalámbrica de sensores que se conectó a un nodo central (servidor). El nodo central posee una interfaz web para acceder a todos los datos recopilados de cada uno de los sensores, lo cual permitió controlar el estado de cada ultracongelador y conocer los datos almacenados, detallados en la siguiente sección. El esquema básico de los circuitos parte de un diseño original unificado, es decir, un diseño electrónico que contiene todos los elementos acoplados en un solo circuito. Este diseño posteriormente se dividió en dos secciones o circuitos independientes, uno denominado *circuito de amplificación* y el otro *circuito de relevo o respaldo*, y adicionalmente se incluyeron puntos de conexión para +5v, +12v, -12v y GND o tierra; estos puntos de conexión son los que se conectan de una placa a otra, con el fin de que, si el sistema posee sistema de relevo o respaldo, se interconecten los circuitos.

En el circuito de amplificación, cada pin está marcado con nombre propio para indicar el sensor o conector de sensor que debe ir conectado allí. El circuito ha sido diseñado de forma modular para que, en caso de un desperfecto o falla, los elementos se puedan desarticular y reemplazar de forma práctica. Asimismo, en caso de un desperfecto en el circuito impreso, éste puede ser impreso de acuerdo con un esquema puntualizado, para posterior soldadura del conjunto de elementos que reposa en estos circuitos. Por el contrario, al no contar con sistema de respaldo, las conexiones de las fuentes de alimentación deben ir directamente a los puntos de conexión específicos en la placa de circuito de amplificación (Figura 1). Todos los elementos incluidos en los circuitos son de fácil manipulación y adquisición con proveedores electrónicos, exceptuando el amplificador de instrumentación que transforma la señal de la termocupla. En la Figura 1, se muestra la foto real del ensamblado físico de los elementos internos y conexiones para cada uno de los sensores del sistema de monitoreo remoto expuestos anteriormente.

El software utilizado para la configuración, calibración y monitoreo del sistema es el Arduino IDE versión 1.8.6, que posee una interfaz sencilla, a través de la cual se puede acceder al monitor serial para observar los datos de medición recopilados por los sensores, desplegados en líneas de texto de acuerdo con las variables y valores descritos anteriormente. Si por alguna razón existe alguna alarma activa, en el monitor serie aparecerá un mensaje adjunto a los datos indicando textualmente qué alarma está activa, por ejemplo: "Alerta de goteo". El acople de sensores en el hardware libre Arduino, permite velar de manera automática, armónica y rigurosa en la captura y transferencia de parámetros para monitoreo ambiental y de condiciones de equipos, asemejando su diseño con las características descritas en la adquisición de señales ambientales del sistema de alerta temprana para la gestión de inundaciones en la cuenca del río Manzanares de Colombia (Guillot, Robles, y Callejas, 2017).

Implementación del sistema de información

El sistema hardware de monitoreo se encuentra conectado a una página web que visualiza los datos registrados por el sistema en tiempo real. En la figura 2 se puede apreciar el diseño del sistema de información, sus componentes y dependencias. En particular, se utilizó una base de datos en MySQL como software libre con 2 tablas, una para almacenar los registros recibidos en tiempo real desde los diferentes sensores y otra para guardar un registro histórico de la temperatura interna de los ultracongeladores, por ser el dato más importante para comprobar la adecuada conservación del MBA, como lo detalla la figura 2.

Por otra parte, la interfaz gráfica diseñada muestra en tiempo real los datos de la temperatura exterior, sensor de apertura de la puerta, decibeles de sonido, fallas eléctricas, inundación, humedad ambiental y temperatura interior de los equipos; y adicionalmente visualiza en forma gráfica el histórico de los valores de temperatura interior del ultracongelador. Esta interfaz es de tipo *responsive* por lo que se acomoda a los diferentes parámetros a evaluar (ver figura 3). Respecto al sistema web, se implementó en una arquitectura cliente servidor, utilizando peticiones Ajax que son dirigidas a un servidor PHP, el cual selecciona los datos y realiza las consultas SQL necesarias a la base de datos MySQL. Gracias a este tipo de arquitectura cualquier usuario autorizado por el biobanco pueda ver los datos desde cualquier lugar.

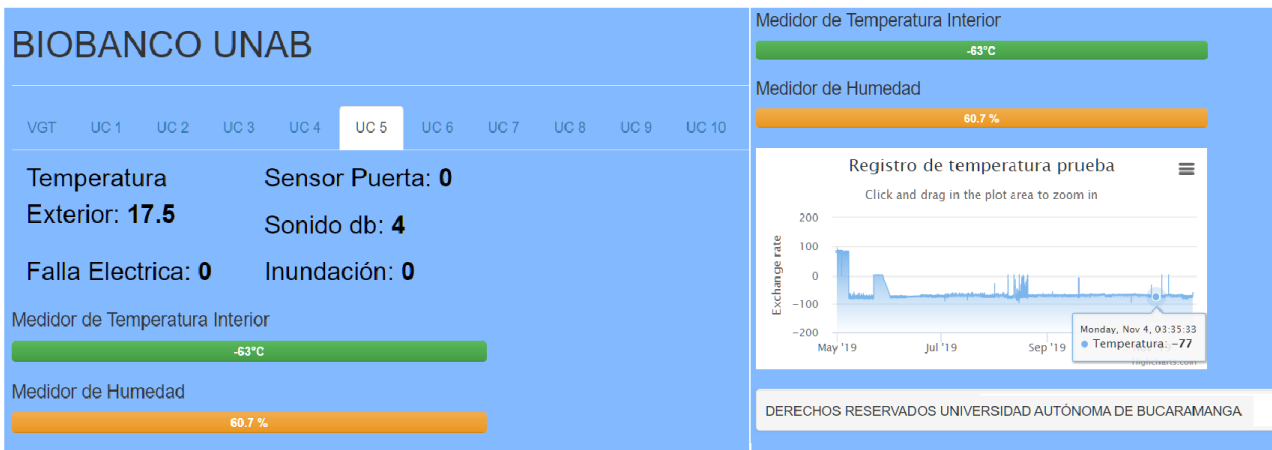


Fig. 3: Interfaz gráfica del sistema de monitoreo: información general (izquierda) e inspección histórica de la temperatura interior de los ultracongeladores (derecha)

Diseño del sistema de alertas

El sistema de alertas se adaptó como un *Web Service* que recibe los datos provenientes del sistema de alertas generando la alerta por medio de correo electrónico y por medio de mensajes de texto. Las herramientas de software libre que se utilizadas correspondieron a MySQL 5.0.15/MariaDB 5.1.44/Percona Server 5.1.70 o superior y PHP 5.2.5 o superior (5.4 o superior recomendado), como lo muestra la figura 4.

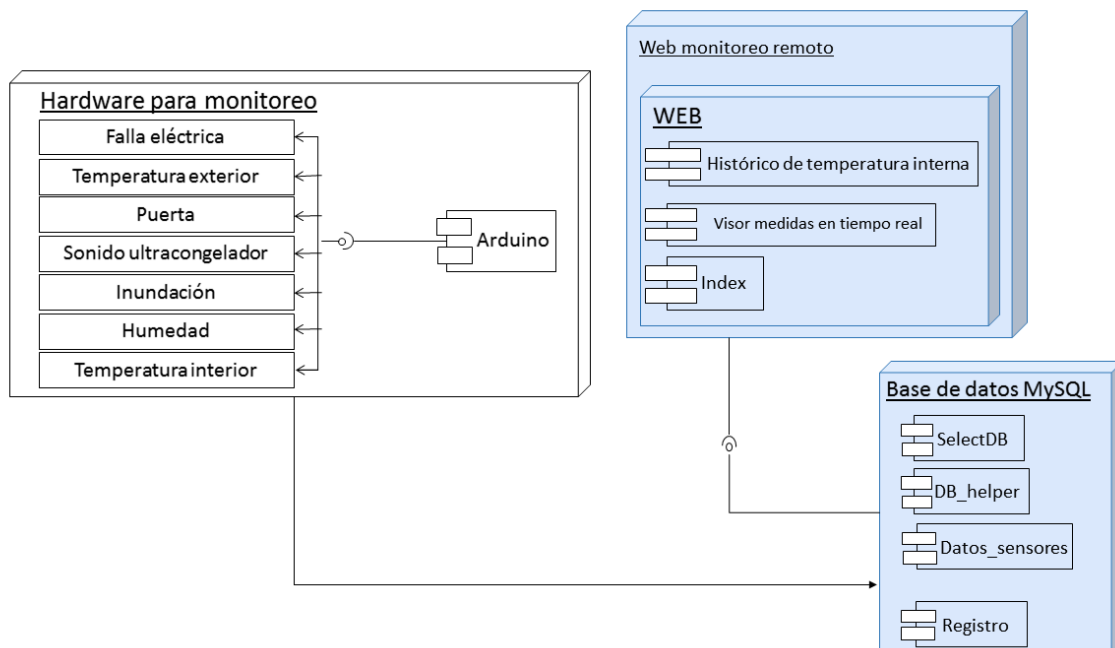


Fig. 4: Diagrama de arquitectura del sistema de alertas para el biobanco

Para cada una de las variables que se deben monitorear, se analizaron y establecieron los valores límite, como condición bajo la cual se generarán la alertas, de acuerdo con la tabla 1. El software de la Arduino tiene configurado un algoritmo que enviará un mensaje de texto al correo electrónico establecido, en caso de la activación de una alarma.

La alarma para el voltaje de red, se detalla en dos líneas. La primera registra la variación de picos arriba del voltaje en los equipos y se ajustará de acuerdo con el tipo de ultracongelador, según su funcionamiento a 120 V ó a 220 V. La segunda para generar una alarma cuando no se detecta flujo de corriente eléctrica.

Una vez el sistema genere la alerta, se procederá a guardar el conjunto de datos en una base de datos MySQL; dependiendo de la alerta y su severidad se enviará un mensaje de texto mediante un servicio de SMS, y un correo electrónico por medio del servidor SMTP de Gmail, a los perfiles de usuario determinados para recibir la alerta correspondiente (Figura 5).

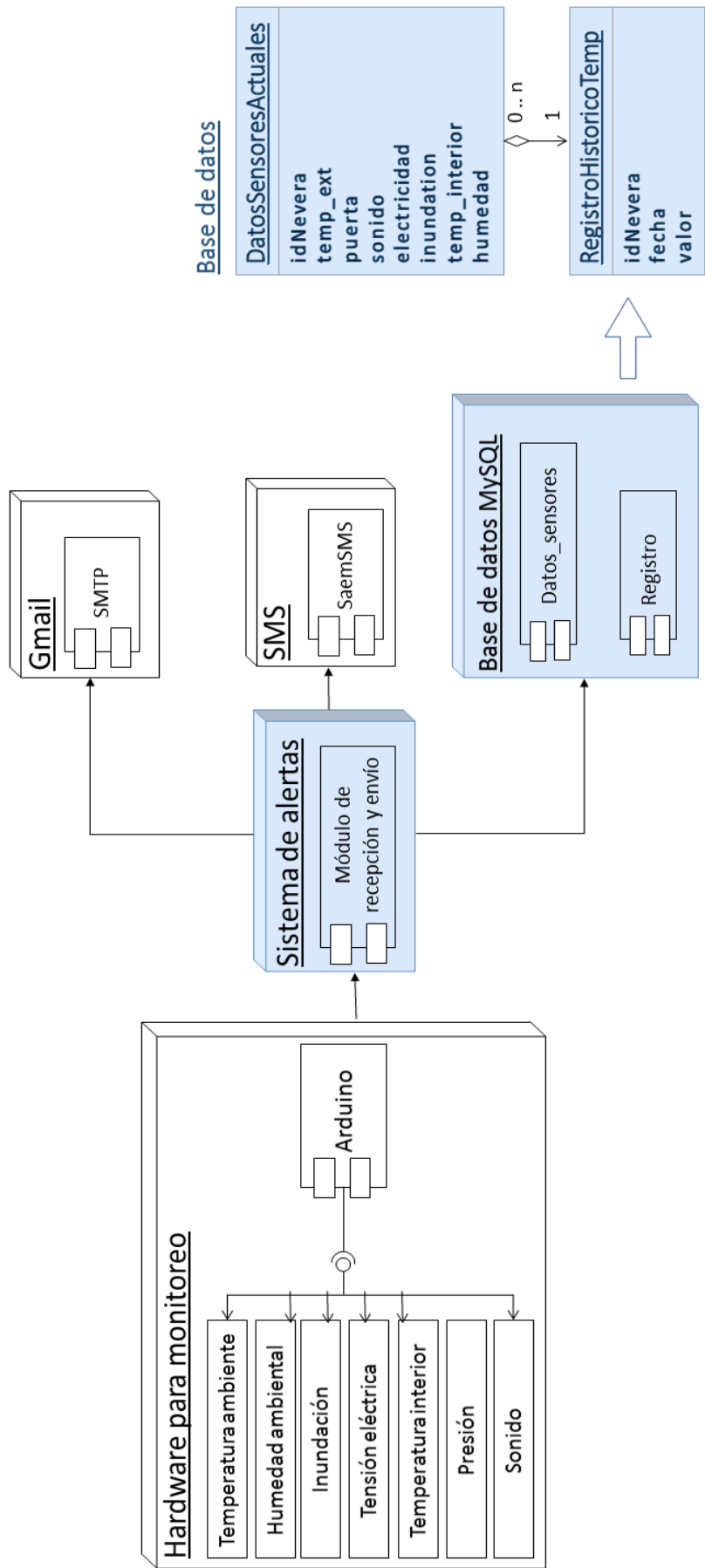


Fig. 2: Diagrama de componentes y base de datos del sistema de información para el sistema de monitoreo

Tabla 1: Condiciones críticas de las variables a supervisar en el sistema web del sistema de monitoreo remoto.

Variable	Parámetro Evaluado	Condición
temperatura	Temperatura Ambiente	Mayor a 24 °C
h	Humedad	Menor a 60%
vol.	Voltaje de la red	Mayor a 132 ó Mayor a 240
	Voltaje de la red	0
inun	Inundación	Activa (Valor Mayor a 0)
termo	Temperatura interior	Mayor a -60 °C
presión	Apertura de puerta	Activa (Valor igual a 0)
micro	Micrófono	Activa (Valor Mayor a 200)

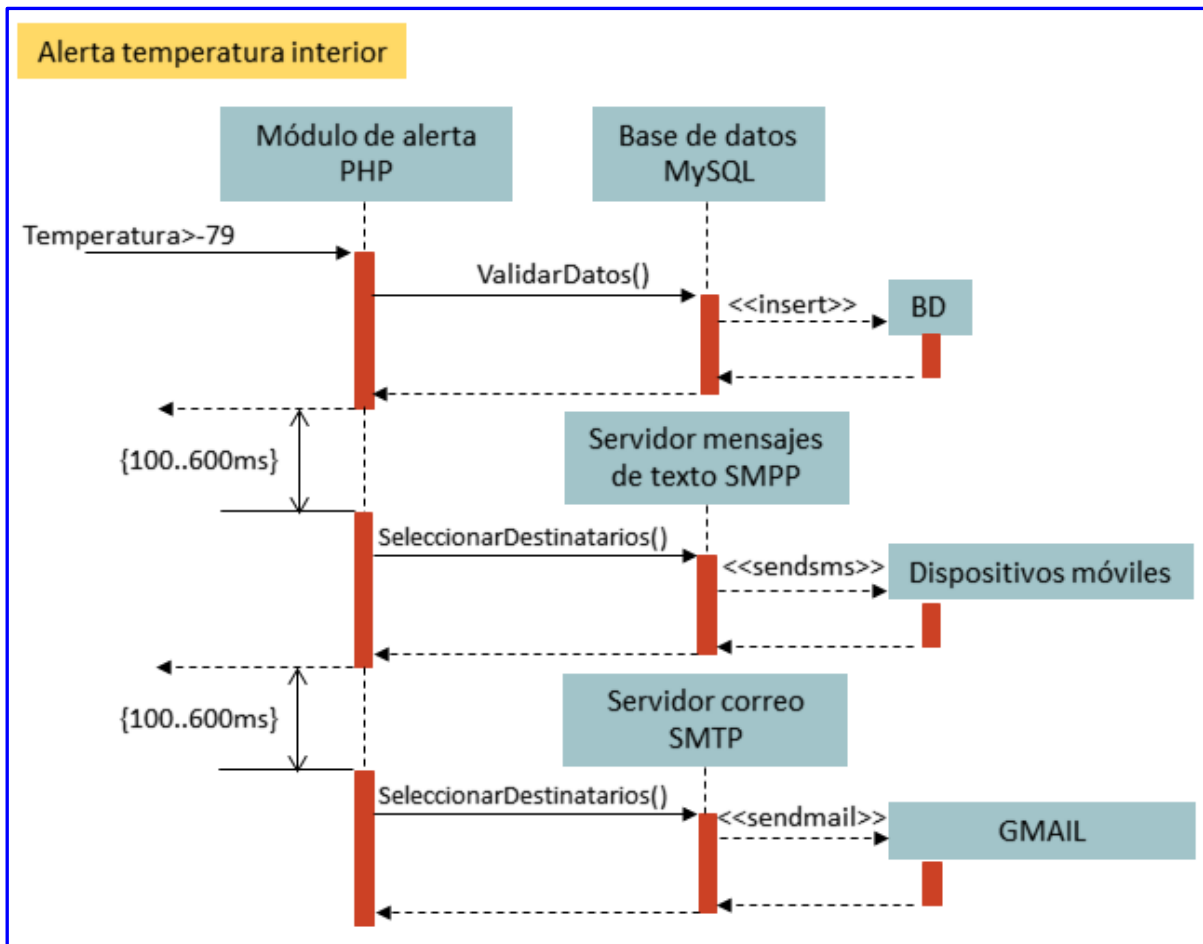


Fig. 5: Diagrama de secuencia del sistema de alertas para monitoreo remoto de las condiciones críticas del biobanco

El proceso de envío de la alerta se realiza por medio de una petición GET a la URL establecida para tal fin, los parámetros que se muestran en la tabla 2 se pasarán, algunos de manera obligatoria, así, cuando los parámetros sean recibidos la API retornará un mensaje de éxito o de error de acuerdo con la respuesta correspondiente.

Tabla 2: Parámetros del servicio web del sistema de alarmas

Parámetro	Tipo de dato	Obligatoriedad	Descripción
ID nevera	Numérico	Obligatorio	Identificador del ultracongelador que genera la alerta
Variable	Texto	Obligatorio	Variable de la alerta (temperatura, humedad, puerta)
Valor	Numérico	Obligatorio	Valor para guardar de la variable
Mensaje	Texto	Opcional	Texto para enviar (diferente al que se programó por defecto)

Proceso de inspección y pruebas de Hardware y Software

En cuanto a los *componentes electrónicos*, el microcontrolador Seeeduino Cloud, fue revisado mediante la conectividad de las placas Seeeduino, por medio del IDE Arduino y la placa Arduino YUN, y se verificó en el menú desplegable de puerto el registro de las placas conectadas al sistema. Para la *termocupla*, se realizó la medición utilizando multímetro, de forma que se pudo medir la salida de voltaje de esta, la cual correspondió a la temperatura en el rango de cientos de milivolts. Así mismo, para los *demás sensores* de fuerza ubicados en la puerta, inundación y sonido, se probó su funcionamiento, comprobando el registro de sus valores en el monitor serial de cada una de las placas. Para todos los sensores se evidenció que enviaran valores acordes a las condiciones reales del área de los ultracongeladores (Figura 6).

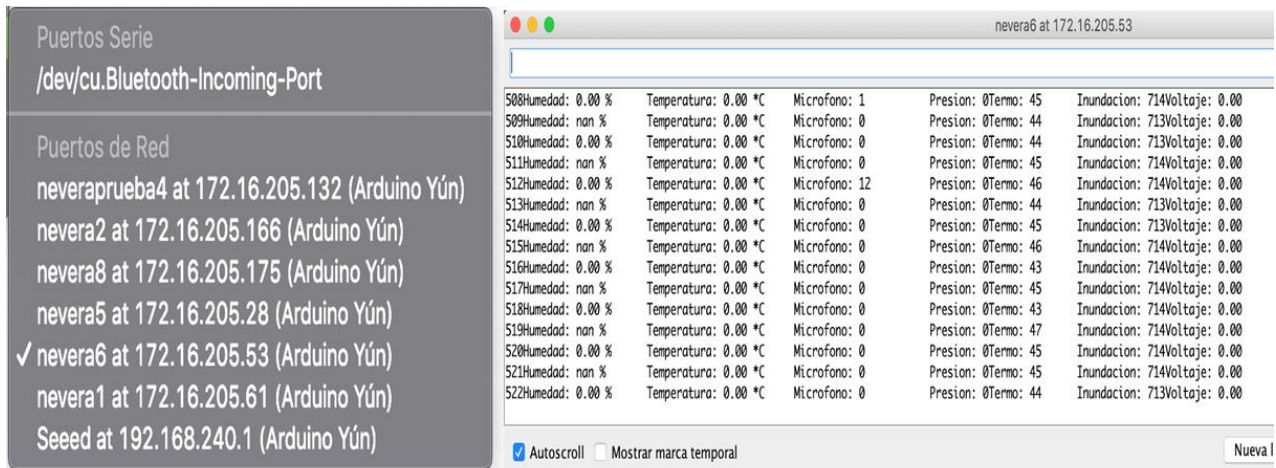


Fig. 6: Resultados de pruebas del hardware del sistema de monitoreo

En complemento, para el *Módulo de Registro de Datos*, se efectuó prueba de carga durante 48 horas, modificando el envío de datos a intervalos de 15 segundos, 60 veces más rápido de lo sugerido (15 minutos). Durante este período se registraron 81.800 ingresos de datos, todos con éxito. Respecto al *Módulo Web*, se pudo evidenciar que el visor web presentaba los datos de acuerdo con la indicación de tasa de refresco cada 15 minutos. Finalmente, para el *Módulo de Alertas* se realizó la simulación de una alerta de goteo en uno de los ultracongeladores, bajando el umbral del sensor de inundación, de forma que generará una alerta por correo de forma constante cada 15 minutos. Esta prueba se realizó por 1 semana (10080 minutos), generando en promedio 100 correos diarios, que llegaron con éxito al destinatario. En la figura 7 se visualizan los resultados de las pruebas descritas.

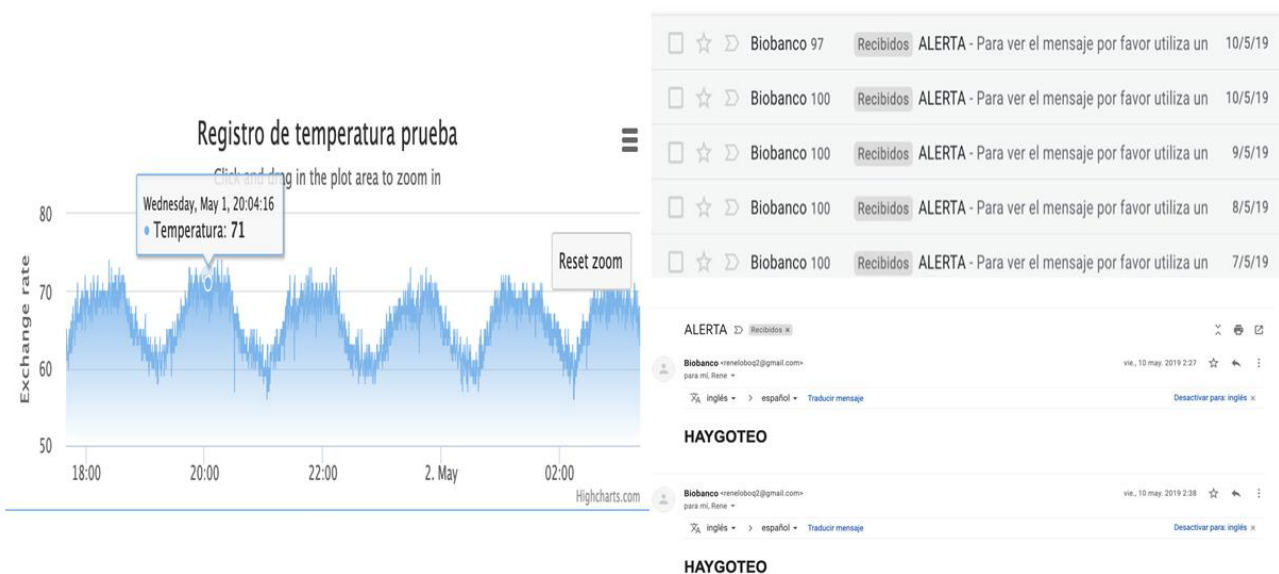


Fig.7: Resultados de pruebas del software del sistema: registro de datos (izquierda) y sistema de alertas (derecha)

Este sistema software implementado a través de herramientas libres y las pruebas realizadas al mismo, permiten contar con una aplicación web para la visualización y alerta de variables críticas de monitoreo, semejante al sistema desarrollado por (Quintero et al, 2017) quienes mediante el uso de nuevas tecnologías implementaron un sistema de monitoreo de variables ambientales y usaron la mensajería push para la emisión de alertas en tiempo real, con la diferencia que el presente trabajo genera alertas para mayor cantidad de eventos diferentes a condiciones ambientales.

Es importante mencionar que el SMR se diseñó teniendo en cuenta las necesidades del biobanco UNAB, el cual durante más de una década se ha ido fortaleciendo con la revisión crítica e implementación progresiva de guías para su gobernanza (Serrano-Díaz et al, 2016), y el incremento en la cantidad de ultracongeladores para su sistema de gestión operativa, con igual proyección a largo plazo. Por tanto, las características de hardware y software libre utilizadas permiten contar con una solución robusta y escalable como la solución del monitoreo (Quintero et al., 2017); sin embargo, nuestro sistema no cuenta en este momento con la opción de parametrización, ni aplicativo móvil como extensión del sistema web, que, aunque no lo limita, si le ofreciera una mayor cobertura de todas las ventajas que se describen en dicho sistema.

Se debe resaltar que el sistema desarrollado en esta investigación tiene como característica la puesta en marcha de una innovación a bajo costo, robusta y escalable no solo para el área de biobancos, sino para diversas áreas en las cuales sea necesario el monitoreo permanente de cualesquiera de las variables de temperatura y humedad ambiental, inundación, corriente eléctrica y sonido en un área física, temperatura interna, cierre de puertas y sonido de equipos, sin necesidad de la presencialidad humana para el registro físico de un ambiente o la revisión de un software.

DISCUSIÓN FINAL

El sistema de monitoreo diseñado se convirtió en una aplicación práctica del internet de las cosas, mediante el ensamble de sensores para medición de diversas y diferentes condiciones ambientales y de equipos, como lo fueron la humedad y temperatura ambiente, fallas eléctricas, inundación, presión o fuerza de puertas y la temperatura de ultracongeladores; sensores que, conectados a microcontroladores Arduino Yun de tipo inalámbrico, permitieron la gestión de material biológico y la consideración de estándares para un biobanco. Con el objetivo de evitar conexiones de alta complejidad y de contar con flexibilidad en la instalación y ubicación del sistema en futuros ultracongeladores, se utilizó hardware y software libre para las lecturas de variables críticas y el envío a un servidor central, que con su interfaz web, servirá para acceder a todos los datos de los sensores desde cualquier lugar. Un servidor permite además el almacenamiento de grandes volúmenes de lecturas en una base de datos y por medio de la interfaz web, la visualización de históricos en todo momento, en este caso para los 8 ultracongeladores del biobanco UNAB y Cardiecol. La generación de alertas por medio de correo electrónico y notificaciones push, cuando se detectan anomalías en tiempo real, permitió la pronta atención y el correctivo de fallos para reducir al mínimo el impacto de eventos sobre el material biológico almacenado.

Finalmente, el sistema de monitoreo remoto planteado en este trabajo permite a la institución consolidarse como un referente en biobancos, por su inversión en la infraestructura necesaria y la búsqueda de cumplimiento de estándares internacionales que permitan garantizar la disponibilidad y calidad de las muestras almacenadas para participación, a nivel nacional e internacional, en proyectos de impacto científico y alta calidad de investigación biomédica; así como la opción de prestación de servicios de gestión de material biológico a terceros.

CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo presentado y a los resultados obtenidos, se pueden plantear las siguientes conclusiones principales:

1.- Los componentes de hardware libre seleccionados permiten establecer que el sensor DHT22, el módulo de goteo o inundación para Arduino, la termocupla tipo K con cable desnudo, el sensor de fuerza, el sensor de sonido análogo gravity DFR0034 y el amplificador operacional LM324, ensamblados y probados sobre una placa Arduino YUN, son útiles para monitorear remotamente el correcto funcionamiento de ultracongeladores y las condiciones ambientales de su área de ubicación.

2.- El software fabricado bajo arquitectura cliente-servidor PHP e implementado con una base de datos MySQL permite el óptimo desarrollo del sistema web para el registro, almacenamiento y visualización de las condiciones monitoreadas para el biobanco. En adición, el Web Service implementado con MySQL 5.0.15/MariaDB 5.1.44/Percona Server 5.1.70 o superior y PHP 5.2.5 o superior, por medio de un servicio de SMS y del servidor SMTP de Gmail, tiene efectividad total para alertar sobre condiciones críticas en el funcionamiento del biobanco.

3.- El sistema de monitoreo remoto producido bajo condiciones de costo razonable automatiza la verificación, en tiempo real, del cumplimiento de estándares internacionales de calidad para biobancos.

AGRADECIMIENTOS

Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB: Proyecto E67003, Acta 088/2016 y Proyecto E78063, Acta 084/2017. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia – Colciencias: Contrato 696-2014 y 743-2015, Código 617399847755, Programa Cardiecol-Unidad Estructural Biobanco.

REFERENCIAS

- Abba, S., Wadumi, J., Lee, J.A. y Crespo, M.L., Design and Performance Evaluation of a Low-Cost Autonomous Sensor Interface for a Smart IoT-Based Irrigation Monitoring and Control System, <https://doi.org/10.3390/s19173643>, *Sensors (Basel)*, 19(17), 3643 (2019).
- Albaladejo, C., Soto, F. y otros tres autores, A low-cost Sensor Buoy System for Monitoring Shallow Marine Environments, <https://doi.org/10.3390/s120709613>, *Sensors (Basel)*, 12(7), 9613-9634 (2012).
- Atzori, L., Iera, A. y Morabito, G., Understanding the internet of things: Definition, Potentials, And Societal Role of a Fast Evolving Paradigm, <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.12.004>, *Ad Hoc Networks*, 56, 122-140 (2017).
- Bitella, G., Rossi, R. y otros tres autores, A Novel Low-Cost Open-Hardware Platform for Monitoring Soil Water Content and Multiple Soil-Air-Vegetation Parameters, <https://doi.org/10.3390/s141019639>, *Sensors (Basel)*, 14(10), 19639–19659 (2014).
- Campbell, L.D., Betsou, F., y otros treinta y cuatro autores, Development of the ISBER Best Practices for Repositories: Collection, Storage, Retrieval and Distribution of Biological Materials for Research, <https://doi.org/10.1089/bio.2012.1025>, *Biopreserv Biobank*, 10(2), 232-233 (2012).
- Castro, S., Medina, B. y Camargo, L., Supervisión y Control Industrial a través de Teléfonos Inteligentes Usando un Computador de Placa Unica Raspberry Pi, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642016000200015>, *Inf. Tecnol.* 27(2), 121-130 (2016).
- Di Gennaro, S.F., Matese, A. y otros tres autores, An Open-Source and Low-Cost Monitoring System for Precision Enology, <https://doi.org/10.3390/s141223388>, *Sensors (Basel)*, 14(12), 23388–23397 (2014).
- Domenech, N., y Cal, N., Biobanks and their Importance in the Clinical and Scientific Fields Related To Spanish Biomedical Research, <https://doi.org/10.1016/j.reuma.2014.02.011>, *Reumatol Clin*, 10(5), 304-308 (2014).
- González, F.C., Villegas, O. y otros tres autores, Smart Multi-Level Tool For Remote Patient Monitoring Based on a Wireless Sensor Network and Mobile Augmented Reality, <https://doi.org/10.3390/s140917212>, *Sensors (Basel)*, 14(9), 17212–17234 (2014).
- Guillot, J.D., Robles, C.A. y Callejas, J.D., Adquisición de Señales Ambientales para un Sistema de Alerta Temprana, <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000500007>, *Inf. Tecnol.*, 28(5), 45-54 (2017).
- Henderson, G.E., Cadigan, R.J., y otros dieciséis autores, Characterizing Biobank Organizations in the U.S.: Results From A National Survey, <https://doi.org/10.1186/gm407>, *Genome Medicine*, 5(1), 3 (2013).
- Karimi-Busheri, F., *Biobanking in the 21st Century*, 1a edición, 149-151. Springer International Publishing, Suiza, (2015).
- McQueen, M.J., Keys, J.L. y otros dos autores, The Challenge of Establishing, Growing and Sustaining a Large Biobank, <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2013.11.017>, *Clinical Biochemistry*, 47(4-5), 239-244 (2014).
- Muñoz, Y., Castrillón, O. y otros dos autores, Análisis de la Escena en la Cocina por Medio de Sensores IoT Diseñados Basados en el Microcontrolador Node MCU ESP8266 y Conectados al Servidor ThingSpeak, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500173>, *Inf. Tecnol.* 30(5), 173-190 (2019).
- Parra, L., Sendra, S. y otros dos autores, Design and Deployment Of Low-Cost Sensors For Monitoring The Water Quality and Fish Behavior in Aquaculture Tanks During the Feeding Process, <https://doi.org/10.3390/s18030750>, *Sensors (Basel)*, 18(3), 750 (2018).
- Poma, N., Vivaldi, F., y otros ocho autores, Remote Monitoring of Seawater Temperature and pH by Low Cost Sensors, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.05.001>, *Microchem J*, 148, 248-252 (2019).
- Pressman, R.S., *Ingeniería de Software un Enfoque Práctico*, 5a edición, 33-35. McGraw Hill, Madrid, España (2002)
- Quintero, W., Robles, C.A., y Viloria, A.M., Sistema de Información para Detección de Crecientes Súbitas en la Cuenca del Río Manzanares en Santa Marta, Colombia, <https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000600011>, *Inf. Tecnol.*, 28(6), 95-102 (2017).
- Rao, A., Vaught, J. y otros cinco autores, Critical Financial Challenges for Biobanking: Report of a National Cancer Institute Study, <https://doi.org/10.1089/bio.2018.0069>, *Biopreserv Biobank*, 17(2), 129-138 (2019).
- Rush, A., Spring, K., y Byrne, J.A., A Critical Analysis of Cancer Biobank Practices in Relation to Biospecimen Quality, <https://doi.org/10.1007/s12551-015-0178-2>, *Biophysical Reviews*, 7(4), 369-378 (2015).
- Samper, M., *Régimen Local. Esquemas*, 2a edición, 19-20. Dykinson, S.L. Madrid, España (2018).
- Serrano-Díaz, N., Páez-Leal, M.C. y otros dos autores, Biobanco: Herramienta Fundamental para la Investigación Biomédica Actual, <https://doi.org/10.18273/revsal.v48n1-2016011>, *Salud*, 48(1), 97-117 (2016).

Simeon-Dubach, D., y Watson, P., Biobanking 3.0: Evidence Based and Customer Focused Biobanking, <https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2013.12.018>, Clin. Biochem., 47(4-5), 300-308 (2014).

Somoza, N., y Tora, M., Biological Safety in the Storage and Transport of Biological Specimens from Patients with Respiratory Diseases Used in Research Settings, <https://doi.org/10.1016/j.arbres.2009.02.001>, Arch Bronconeumol, 45(4), 187-195 (2009).

Soo, C., Mukomana, F. y otros dos autores, Establishing an Academic Biobank in a Resource-Challenged Environment, <https://doi.org/10.7196/SAMJ.2017.v107i6.12099>, S Afr Med J, 107(6), 486-492 (2017).

Vargas-Salgado, C., Aguila-Leon, y otros dos autores, Low-cost Web-based Supervisory Control and Data Acquisition System for a Microgrid Testbed: A Case Study in Design and Implementation for Academic and Research Applications, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02474>, Heliyon, 5(9), e02474 (2019).

Vaught, J., Biobanking comes of age: The Transition to Biospecimen Science, <https://doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-010715-103246>, Annu Rev Pharmacol Toxicol, 56(1), 211-228 (2016).

Vaught, J., y Lockhart, N.C., The Evolution of Biobanking Best Practices, <https://doi.org/10.1016/j.cca.2012.04.030>, Clinica Chimica Acta, 413(19-20), 1569-1575 (2012).

Yuzbasioglu, A., y Ozguc, M., Biobanking: Sample Acquisition and Quality Assurance for 'omics' Research, <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2012.11.016>, N Biotechnol., 30(3), 339-342 (2013).

Zika, E., Paci, D., y otros siete autores, A European Survey on Biobanks: Trends and Issues, <https://doi.org/10.1159/000296278>, Public Health Genomics, 14(2), 96-103 (2011).

Página en blanco