

Implementación de un Prototipo Inalámbrico para Monitoreo de Pacientes Ambulatorios, utilizando Sensores de Presión Arterial y Ritmo Cardíaco

Fernanda Ortiz, Soraya Sinche, Pablo Hidalgo, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito – Ecuador

Resumen –El presente proyecto desarrolla un sistema que permite monitorear presión arterial y ritmo cardíaco de pacientes ambulatorios a través de un prototipo que realiza mediciones de manera automática. El sistema utiliza módulos que permiten adquirir los datos del sensor de presión arterial y ritmo cardíaco. Estos datos son enviados vía WiFi a un servidor web para monitoreo. El servidor web recibe la información, la almacena y permite la visualización en forma interactiva. Adicionalmente, la aplicación web se enfoca en un sistema de gestión para mejorar el control de historias clínicas y datos de los pacientes.

Índices –Sensores; Presión Arterial; Ritmo Cardíaco; Telecuidado.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los problemas cardiovasculares a nivel global son el principal caso de muerte [2]. También se conoce que la presión arterial elevada es el principal factor de riesgo que conlleva a problemas cardiovasculares [3]. Por esta razón, existe la necesidad de una temprana detección, tratamiento adecuado y un continuo monitoreo de las personas que tienen un alto riesgo de afecciones cardiovasculares o que les ha sido detectado algún tipo de problema cardiovascular.

Por otro lado, el avance de las telecomunicaciones y sistemas de información, han promovido escenarios para un gran desarrollo de tecnologías en áreas de salud y medicina, específicamente en la Telemedicina, la cual permite mejorar la calidad de atención a los pacientes mediante el intercambio de información médica hacia y desde cualquier lugar; sin embargo todavía existen barreras centradas en los costos muy elevados de equipos especializados para este propósito. Además, con la ayuda de los nuevos avances tecnológicos en lo que respecta a sensores médicos, es posible implementar sistemas que permitan realizar un monitoreo remoto en tiempo real de pacientes con problemas de salud.

El presente trabajo desarrolla el diseño e implementación de un prototipo que permite realizar el monitoreo continuo de pacientes ambulatorios con problemas cardíacos. La solución propuesta utiliza como sistema de comunicación tecnología inalámbrica debido a que proporciona un servicio adecuado para monitoreo remoto y movilidad con los dispositivos de medición, se

emplea WiFi debido al alcance para la interconexión de los equipos manejando un mismo estándar de comunicación.

El aporte de este sistema con respecto a otras soluciones existentes en el mercado radica en que además del uso de sensores, se ofrece una herramienta de control y monitoreo de la presión arterial y el ritmo cardíaco que también permite unificar diagnósticos y compartir resultados y tratamientos en tiempo real, con un registro electrónico de historias médicas almacenadas en una base de datos para su posterior visualización.

A continuación la Sección II presenta algunos conceptos básicos sobre Telemedicina y su clasificación, así como también la arquitectura general de un sistema de Telecuidado. Luego, en la Sección III se presenta las consideraciones técnicas del diseño de prototipo a ser implementado. A seguir, la Sección IV incluye cómo se realizó la construcción e implementación del prototipo de prueba. Luego de lo cual en la Sección V se presentan las pruebas realizadas con sus correspondientes resultados. Finalmente se presentan las respectivas conclusiones del presente trabajo.

II. FUNDAMENTOS DE TELEMEDICINA

La Telemedicina se centra en la capacidad de ofrecer un servicio que permitabrindar ayuda médica en cualquier lugar o circunstancia, independientemente de la tecnología utilizada. Dada la variedad de especialidades en medicina y las diferentes formas de usar la tecnología, se presenta una alternativa de clasificación:[4]

- Basado en el tiempo, considera los intervalos que existen entre la atención médica y el instante en el que se realiza la comunicación. Esta conexión se puede dar en tiempo real o diferido y utiliza un entorno de sistemas multimedia que permiten crear, interactuar y comunicarse a través de una combinación de diferentes códigos; la información se presenta a los usuarios en forma de texto, imágenes, video y sonido.
 - Por tipo de servicio se tiene: teleconsulta, telecuidado, teleterapia, telemonitoreo, telefarmacia.
- Por tipo de especialidad se clasifica en: telepatología, telecirugía, teledermatología, telecardiología, teleendoscopia, teleradiología

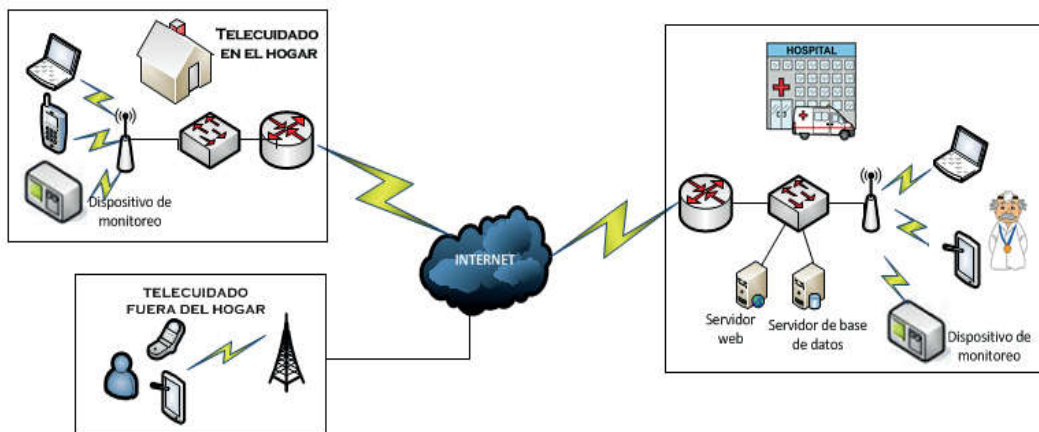


Fig. 1Arquitectura general de un Sistema de Telecuidado [1]

El Telecuidado comparte el atributo de la Telemedicina; sin embargo se enfoca en proveer un monitoreo remoto, continuo y automático del estado de los pacientes. En la actualidad se encuentran sistemas que permiten mejorar la atención tanto dentro como fuera del hogar. Algunas de estas implementaciones son inalámbricas, lo que permite a los profesionales el uso de algunos dispositivos en la evaluación y diagnóstico de los pacientes; sin embargo la mayor parte de los sistemas implican soluciones no portátiles y monitoreo periódico.

La arquitectura general de la prestación de servicios de un sistema de Telecuidado se muestra en la Fig. 1. Esta infraestructura cuenta con componentes claves como servidores, bases de datos y equipos médicos, que permiten establecer una conexión electrónica, almacenando y transmitiendo información.

En la Tabla I se presenta un esquema con distintas tecnologías y dispositivos utilizados en los sistemas de Telecuidado como los sensores para adquisición de datos y alarmas para la notificación de eventos.

TABLA I
COMPONENTES DE UN SISTEMA DE TELECUIDADO.

Dispositivos	Elementos de interconexión	Redes de datos	
		Cableadas	Inalámbricas
Sensores	Router	Fast Ethernet	Bluetooth
Controladores	Modem inalámbrico	Giga	WiFi
Alarmas	Modem cableado	Ethernet	ZigBee
Computadores		10Giga	Via celular
Smartphones		Ethernet	
Tablets			

El sensor es uno de los elementos más importantes en el presente sistema. A continuación en la Tabla II se detallan algunos tipos de sensores que se emplean en aplicaciones de Telemedicina para adquirir datos de presión arterial y ritmo cardíaco. [1]

III. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PRUEBA

El escenario bajo el cual se desarrolla el prototipo se basa en tres subsistemas: Subsistema de obtención de datos, Subsistema de envío de datos y Subsistema de recepción de datos. El diseño de cada uno se lo realiza en base a

TABLA II
TIPOS DE SENSORES APLICADOS A LA TELEMEDICINA.

MODELO	APLICACIONES
SITRANS 	Para aplicaciones direccionadas a la industria automotriz, medicina y control de procesos.
MPX5100 	Para una amplia gama de aplicaciones militares, industriales y equipos médicos; combina técnica avanzadas que entregan una señal de salida precisa proporcional a la presión aplicada.
MS5536C 	Para aplicaciones en el área industrial como medidor de fluidos y en medicina como medidor de presión arterial.
SERIE 1620 	Para ser utilizado con equipos de presión arterial desechables, máquinas de diálisis y bombas de infusión.

módulos de hardware y software, considerando requerimientos y características básicas para el funcionamiento del prototipo, como se muestra en la Fig. 2.

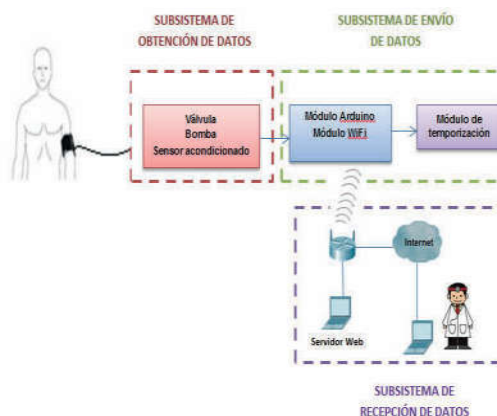


Fig. 2 Diagrama de Subsistemas del Prototipo[1].

A. Subsistema de obtención de datos

Este subsistema se encarga de la adquisición de datos del sensor. Está compuesto por el brazalete, la bomba, la electroválvula y un módulo hardware acondicionado del

sensor (Fig. 3), los mismos que se describen a continuación.[6]

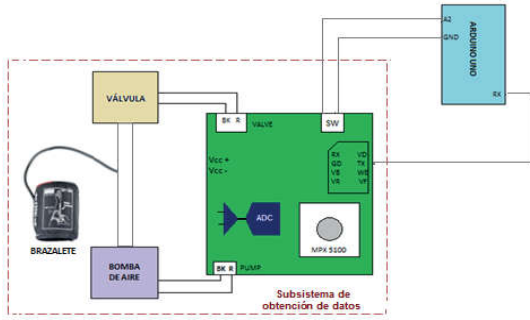


Fig.3 Diagrama general del subsistema de obtención de datos [1]

- **Brazalete:** Éste se infla hasta que la arteria se encuentre totalmente obstruida. El circuito mide la presión arterial y ritmo cardíaco mientras se desinfla el brazalete.
- **Bomba:** Se encarga de inflar automáticamente el brazalete, considerando que la capacidad máxima de inflado es cercana a 280 mmHg.
- **Electroválvula:** Su función es controlar la entrada y salida de aire hacia el brazalete. Para el diseño se utiliza la electroválvula KSV05B, que es exclusiva para aplicaciones médicas.
- **Módulo hardware acondicionado del sensor:** Es el responsable de obtener las medidas y enviarlas al siguiente subsistema para su procesamiento. Se seleccionó el sensor MPX5100 antes mencionado, debido a que está acondicionado para emitir una señal digital, lo que facilita el manejo de datos.

B. Subsistema de envío de datos

Este subsistema toma la información de presión arterial y ritmo cardíaco del subsistema de obtención de datos y transmite la misma mediante un módulo WiFi al servidor, para su almacenamiento. Está conformado por una plataforma Arduino Uno, un módulo de comunicación y un módulo de temporización que se describen a continuación.

- **Plataforma Arduino Uno:** Simplifica el proceso de trabajar con microcontroladores y optimiza el uso de módulos al ser una plataforma de hardware ampliable y software de código abierto. [5]

- **Módulo de comunicación:** El módulo WifiShield MRF24WB0MA es compatible con la plataforma Arduino Uno; se conecta en forma inalámbrica al servidor a través de IEEE 802.11 b/g/n. Cuenta con cifrado: WEP y WPA2 Personal. [1]
- **Módulo de temporización:** En este módulo se visualizan los intervalos de tiempo en segundos para el control automático de toma de medidas. Este módulo recibe la señal digital de los pulsadores para mostrar las acciones como subir, bajar, encender, y pausar el proceso de medición. Para ello se usa un display a color QVGA 2.2 TFT 240x320.

C. Subsistema de recepción de datos

A través de este subsistema, se puede visualizar remotamente los datos obtenidos del sensor de presión arterial y ritmo cardíaco, a través de una interfaz gráfica que se monta en un servidor web y de base de datos, el cual permite adicionalmente el almacenamiento de la información. La red de datos incluye el equipo y el servicio de Internet brindado por un proveedor, así como un router inalámbrico para la conexión física del servidor y la comunicación WiFi del dispositivo, debiendo destacar que esta comunicación debe ser segura. (Fig. 4).



Fig.4 Disposición física de la red [1]

D. Diseño de la aplicación para la visualización de los datos [7] [8]

Para la implementación de la plataforma de visualización de datos se desarrolló todo el procedimiento de diseño de software. En el programa de la plataforma web se utiliza lenguaje PHP (*HypertextPreprocessor*), además de AJAX (*Asynchronous JavaScript and XML*) y CSS (*Cascading Style Sheets*). Se realiza la implementación de una base de datos con MySQL que permite almacenar la información médica de los pacientes y los datos de los usuarios que acceden a la plataforma.

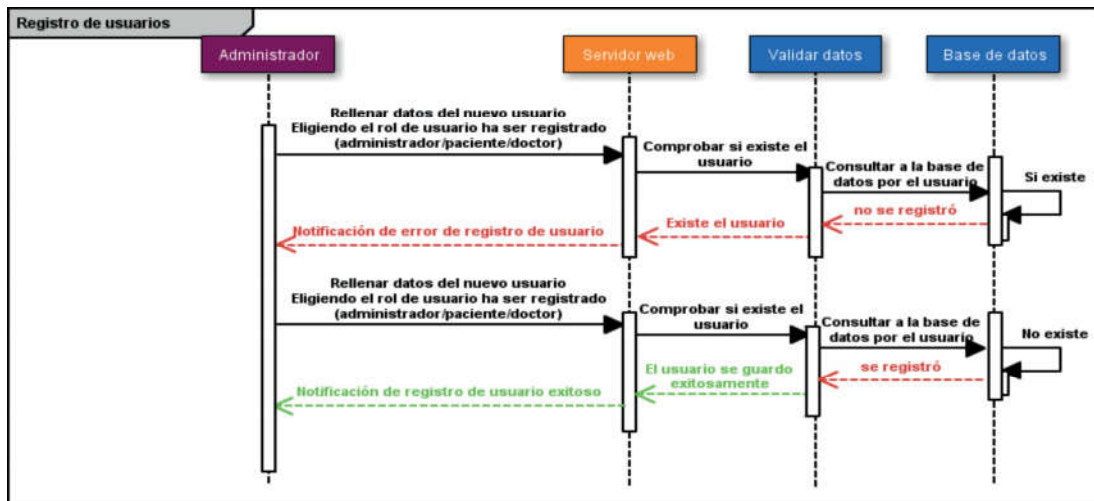


Fig.5 Diagrama de secuencia para el registro de usuarios [1]

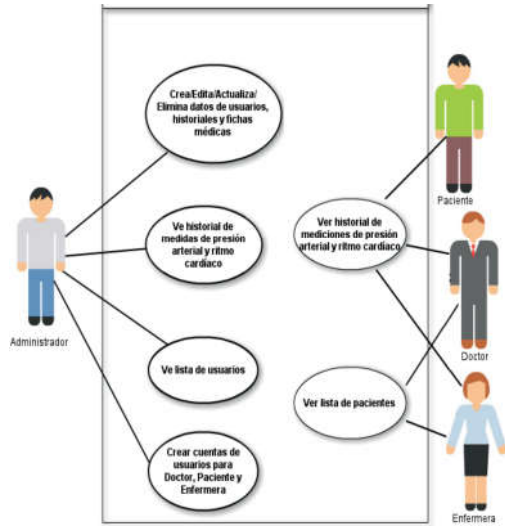


Fig.6 Diagrama de caso de uso del sistema [1]

Con la metodología de UML (*Unified Modeling Language*) para modelar el sistema se determinaron los criterios y requerimientos para el diseño del sistema web:

- Verificar la autenticidad del usuario mediante su ID asignado por el administrador y su clave personal.
- Sólo el administrador está autorizado a enrolar usuarios nuevos, sean doctores, enfermeras o pacientes.
- Los doctores están autorizados para actualizar la información médica de los pacientes y dejar observaciones diarias si es necesario.

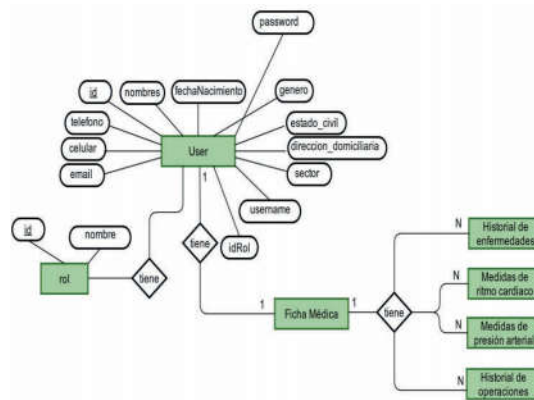


Fig.7 Modelo entidad relación [1]

- La información que se debe ingresar por cada paciente se relaciona con: datos personales, historial de enfermedades, alergias, cirugías previas, medicación actual.
- Para la toma de medidas, la aplicación realiza una petición al dispositivo cada 10 segundos hasta que se establezca una conexión y se puedan adquirir datos.
- Se generan reportes en forma de gráficas estadísticas del historial de medidas de presión arterial y ritmo cardíaco de los pacientes.

En la Fig. 5 se muestra el diagrama de secuencia para uno de los casos desarrollados, relacionado con el registro de usuarios. El detalle del resto de casos se los puede encontrar en la referencia [1].

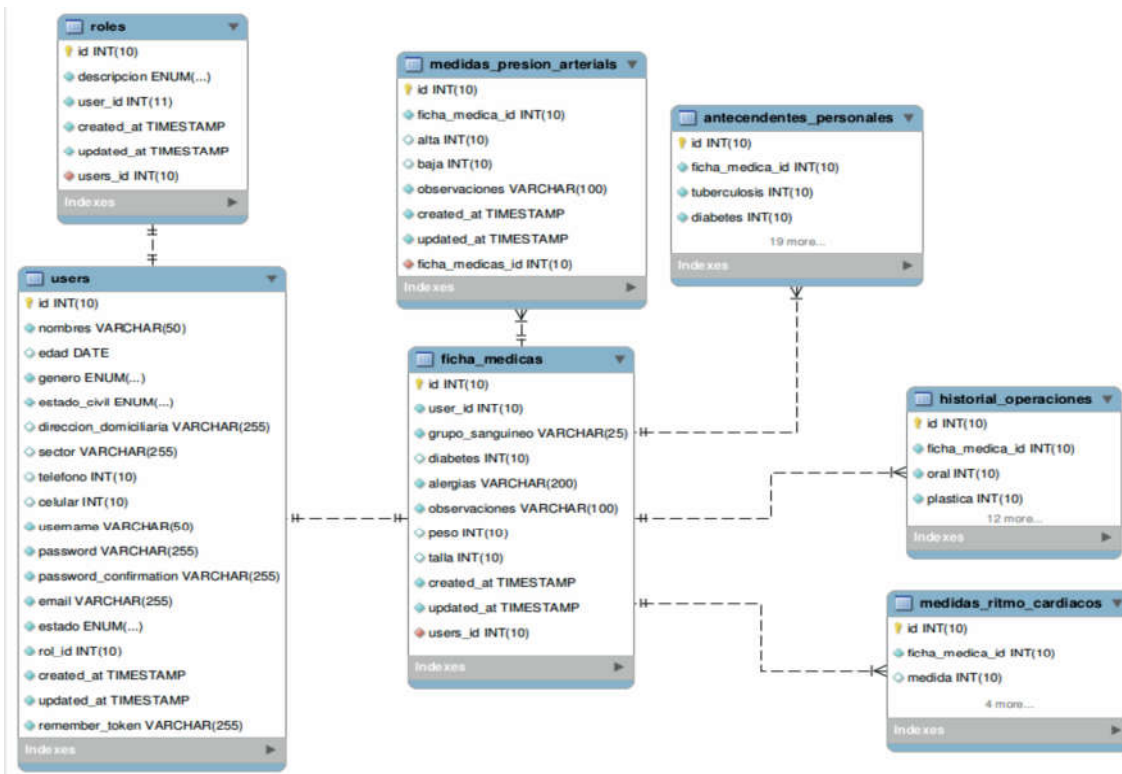


Fig.8 Modelo relacional del sistema propuesto [1]

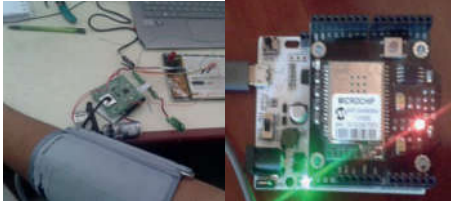


Fig.9 Bloque N°1 [1]

Fig.10 Bloque N°2 [1]



Fig.11 Bloque N°3 [1]



Fig.12 Montaje final del prototipo [1]

Para definir el conjunto de acciones a ejecutar, se presenta en la Fig. 6 el diagrama de casos de uso del sistema.

A partir de los requisitos mencionados anteriormente, se diseña la base de datos, que es el corazón del sistema sobre el cual toda la información será almacenada y manipulada según los requerimientos del usuario.

El modelo entidad relación es un mecanismo de modelado de datos; esto quiere decir que la información provista por el usuario estará representada en las denominadas entidades. De forma adicional, cada entidad tiene una o varias características que la representan así como restricciones.

En la Fig. 7, se presenta el modelo entidad relación, el mismo que cuenta con siete entidades que representan al sistema. Estas entidades son: Rol, User, Ficha Médica, Historial de enfermedades, Medidas de ritmo cardíaco, Historial de operaciones y Medidas de presión arterial.

En este diagrama además se representa la interacción entre cada una de las entidades a través de las líneas que las unen, así como la cardinalidad entre ellas. Por ejemplo, la relación entre la entidad Usuario y Ficha Médica determina que un usuario pueda tener solo una ficha médica.

El modelo relacional o modelo lógico se indica en la Fig. 8, basado en el modelo entidad relación del sistema diseñado.

IV. IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

A. Implementación del hardware y software de los subsistemas de obtención y envío de datos

El proyecto implementa un prototipo para monitoreo dividido en tres bloques, con este fin, se elabora de circuitos impresos tanto del módulo acondicionado del sensor como del módulo de temporización que incluye el display y pulsadores de control; también se realiza el ensamblaje del módulo Arduino Uno y el módulo WiFi.

Como ejemplo, en el bloque N°1 (Fig. 9), se observa el brazalete, la placa acondicionada del sensor, la bomba de aire y la electroválvula. En el bloque N°2 de la Fig. 10, En la Fig. 11 se observa el bloque N°3, que consta de los pulsadores y la pantalla LCD donde se pueden visualizar los intervalos de tiempos de toma de muestras se presenta el módulo Arduino Uno y el módulo WiFi interconectados.

El peso y el tamaño del prototipo son importantes por la movilidad del sistema; por esta razón se incorporó en la parte lateral una batería pequeña con suficiente capacidad de suministro de corriente. Adicionalmente se construyó un contenedor con compartimientos. En la parte inferior se encuentra el módulo de obtención de datos con salida para el brazalete. En la parte media se ubica el módulo Arduino y el módulo WiFi, en tanto que en la parte superior se coloca el módulo visual de temporización. En la Fig. 12 se muestra el montaje final del prototipo.

Para la implementación del programa del módulo Arduino Uno se necesitó escribir un programa con alrededor de 134 líneas de código detalladas en la referencia [1]. A continuación se describe un resumen de los subprocesos ejecutados por el programa:

1) *Establecimiento de la comunicación:* Este subproceso se encarga de iniciar la conexión del módulo Arduino Uno y la red de datos. Si por algún motivo se produce un error en la conexión, se ejecuta un condicional que realiza los intentos necesarios cada 10 segundos hasta que la comunicación se establezca correctamente.

2) *Inicialización de variables de temporización:* En este subproceso se definen los parámetros externos para el tiempo de medición mediante los pulsadores. Por defecto se iniciará con un tiempo de muestreo de 30 segundos.

3) *Adquisición de datos:* Establecidos los parámetros externos, se procede a la recopilación de datos desde el módulo del sensor acondicionado al Arduino Uno.

4) *Envío de la información:* Este subproceso se encarga de transmitir los valores medidos por el sensor hacia el servidor web.

B. Implementación de la aplicación web para el subsistema de recepción de datos

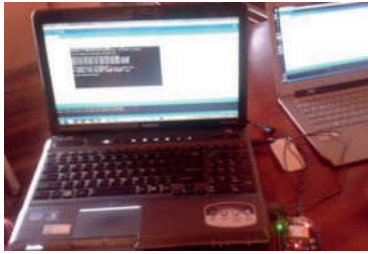


Fig.13 Prueba: Conectividad del módulo WiFi [1].

Partiendo del diseño mencionado en la sección III precedente, se realiza la programación de la página web y la base de datos que poseen más de 300 líneas de código detalladas en la referencia [1]. Se utilizó Laravel como *framework* para PHP, permitiendo abstraer la complejidad de ciertas tareas que son repetitivas, como por ejemplo manejo de sesiones, autenticación, autorización, manejo de peticiones y abstracción de URLs. Además se hizo uso de plantillas *open source* basadas en HTML, CSS y Javascript para construir tablas, botones, formularios y validaciones. Para la consulta de información se generó alrededor de *seisscripts* para la base de datos.

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas realizadas se establecieron de acuerdo al alcance planteado; en primer lugar se realizan pruebas de simulación con el módulo acondicionado del sensor para verificar el comportamiento de los datos recibidos y pruebas de conectividad del módulo WiFi hacia la red. En la Fig. 13 se observa al led rojo encenderse cuando se establece la conexión a la red.

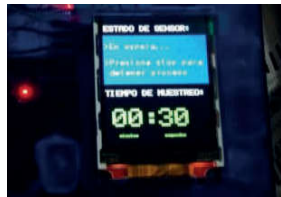


Fig.14 Prueba: Control de pulsadores para intervalos de tiempo [1]

Instalado todo el prototipo, se enciende el mismo para verificar el control de los pulsadores en los intervalos de tiempo de toma de medidas. (Fig. 14).

Se realiza una prueba general del prototipo enfocada a una persona (Fig. 15); la misma permite validar la



Fig. 15 Prueba del sistema realizada para un usuario [1]



Fig. 16 Página principal – inicio de sesión [1].

funcionalidad de la solución.

Finalmente se efectuaron pruebas del funcionamiento de la aplicación web, las cuales consistieron en:

- Ingreso a la página www.tesis-fortiz.rhcloud.com para inicio de sesión, como se muestran en la Fig. 16.
- Establecimiento de la comunicación con el dispositivo y toma de medidas de presión arterial y ritmo cardíaco tal como se observa en la Fig. 17.

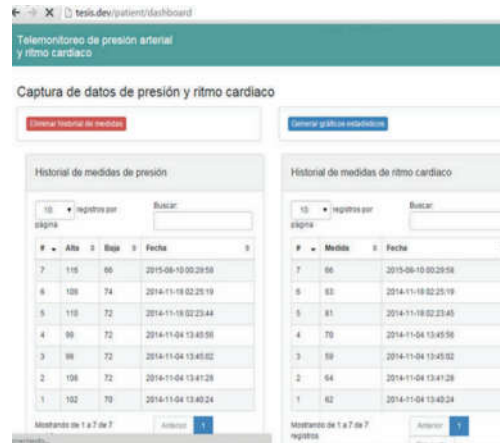


Fig. 17. Comunicación con el dispositivo y toma de datos [1].

- Funcionamiento del panel de administración, lo cual se indica en la Fig. 18.
- Funcionamiento del formulario de registros; éste se visualiza en la Fig. 19.

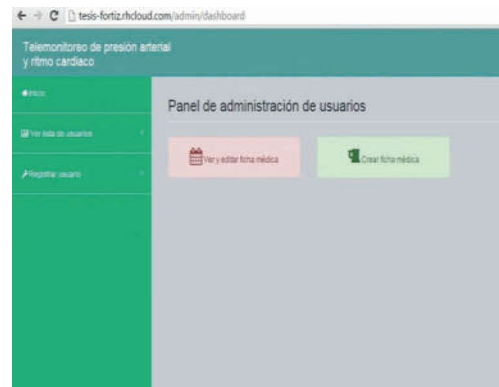


Fig. 18 Panel de administración de usuarios [1].

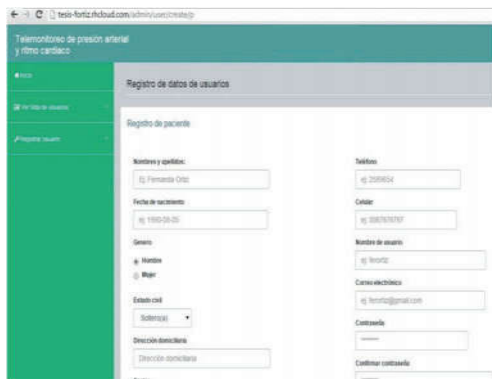


Fig. 19 Registro de usuarios [1]

- Funcionamiento de formulario de actualización de historias clínicas, como se observa en la Fig. 20.
- Generación de gráficas estadísticas que pueden ser descargadas como imagen o impresos directamente; como se visualiza en la Fig. 21.

De las pruebas realizadas se observa el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo de presión arterial y ritmo cardíaco. La aplicación web implementada cumple con los requisitos planteados:

- Fiabilidad en los procesos de validación de los pacientes.
- Comprensión dinámica y sencilla para el usuario.
- Eficiencia en la generación de fichas médicas y gráficas para reportes.
- Funcionalidad en los servicios de la plataforma.

De los datos obtenidos en las pruebas, se pudo analizar que la presión arterial y ritmo cardíaco del paciente se encuentran en rangos normales, con variaciones pequeñas causadas por la posición y movimiento del brazo. Se observa que si no se encuentra bien colocado el brazalete en el usuario, éste no se inflará completamente, por lo que el sensor no tomará la medida y el valor que se mostrará en la pantalla será 0.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La importancia de los sensores y los sistemas de comunicación aplicados a la medicina fortalecen la prevención de enfermedades o posibles anomalías de la salud, mediante el monitoreo, control y vigilancia continua

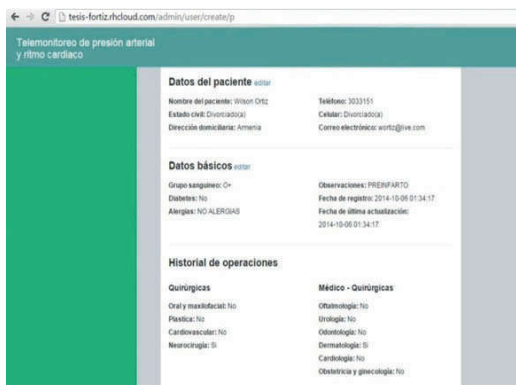


Fig. 20 Historia clínica de la solución planteada [1]



Fig. 21 Reportes con gráficas estadísticas [1]

de los pacientes; con ello se conseguirá diagnosticar tratamientos que podrían auxiliar oportunamente una vida. Este proyecto enfoca la tecnología a mejorar la calidad de vida de los individuos que se encuentren con problemas de salud; el sistema es fácil de instalar en el hogar, en residencias de ancianos, en centros de salud o en grandes hospitales por su comodidad, portabilidad y costos.

El sistema de monitoreo de presión arterial y ritmo cardíaco implementado, es una innovación de los sistemas tradicionales de toma y registro de medidas, puesto que, utiliza el sensor como un nuevo recurso para obtener información del paciente. Además constituye un precedente para la elaboración de nuevos sistemas de gestión en hospitales garantizando mejorar la atención, al convertir el proceso de historias médicas en un esquema cero papeles, optimizando el manejo de datos, los recursos asistenciales del hospital y la disminución de los desplazamientos entre los pacientes y el personal especializado.

Este proyecto puede ser tomado en cuenta para realizar implementaciones futuras que impliquen considerar el uso del mismo prototipo, con diferentes tipos de sensores que envíen variables adicionales. Si bien es cierto que el prototipo está orientado únicamente a evaluar presión arterial y ritmo cardíaco, el mismo puede ser modificado para realizar mediciones de temperatura, glucosa, oxígeno, y otros.

Además este tipo de soluciones pueden ayudar a recolectar datos de signos vitales por un periodo de tiempo considerable, con el objetivo de analizar el patrón de comportamiento de cada paciente y usando técnicas aprendizaje de máquina detectar de forma temprana problemas cardiovasculares.

VII. REFERENCIAS

- [1] ORTIZ, Fernanda, "Diseño de un sistema inalámbrico para monitoreo de pacientes ambulatorios, utilizando sensores de presión arterial y ritmo cardíaco e implementación de un prototipo de prueba", Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Marzo, 2016.
- [2] <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/en/> (September 2016).
- [3] Global Burden of Metabolic Risk Factors for Chronic Diseases Collaboration. "Cardiovascular disease, chronic kidney disease, and diabetes mortality burden of cardiometabolic risk factors from 1980 to 2010: a comparative risk assessment". *Lancet Diabetes Endocrinol.* 2014; 2: 634–647

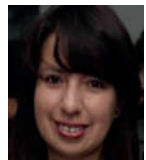
- [4] MENESES, Alexis; “Estudio de viabilidad para prototipo de plataforma de Telemedicina que mide la actividad cardíaca en tiempo real via celular”. Documento electrónico:
- [5] http://www.dalcame.com/wdescarga/Proy_Esp_ama.pdf
- [6] TAPIA, Carlos, MANZANO, Héctor; “Evaluación de la plataforma Arduino e implementación de un sistema de control de posición horizontal”, Documento electrónico: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5522/1/UPS-GT000511.pdf>
- [7] GODOY, Diana; “Plataforma de telemedicina para el monitoreo de bioseñales;” Documento electrónico:
- [8] www.dalcame.com/wdescarga/pani.pdf
- [9] ANÓNIMO; “Understandig MVC”; Documento electrónico: <http://book.cakephp.org/2.0/es/cakephp-overview/understanding-model-view-controller.html>
- [10] ANÓNIMO; “Diseño conceptual y lógico de base de datos”; Documento electrónico:
- [11] <https://es.scribd.com/doc/33287143/Disen-o-conceptual-y-logico-de-base-de-datos#scribd>

VIII. BIOGRAFÍA



Fernanda Ortiz

Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones, en la Escuela Politécnica Nacional en Quito. Certificaciones obtenidas CCNA y CCDA.
(fer_ortiz89@hotmail.com)



Soraya Sinche

Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones, en la Escuela Politécnica Nacional en Quito. Master of Science Politécnico di Torino en Italia. Estudios de Postgrado en Conectividad y Redes de Telecomunicaciones en la EPN. Es profesora de la Escuela Politécnica Nacional.
(soraya.sinche@epn.edu.ec)



Pablo Hidalgo

Obtuvo el Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en la Escuela Politécnica Nacional. Estudios de postgrado en Telecomunicaciones en el Deutsche Bundespost. Obtuvo el título de Magister en Conectividad y Redes de Telecomunicaciones en la E.P.N. Actualmente se desempeña como profesor principal de la E.P.N.
(pablo.hidalgo@epn.edu.ec)