

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Proyecto de Aplicación

**Desarrollo de Sistema de Instrumentación Biomédica de Bajo
Costo en el Contexto de la Industria 4.0: Tecnología Centrada en
las Personas.**

Que para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta

Ing. Miriam Consuelo Mata Macías

Director de proyecto: Dr. Juan Manuel Terrazas Gaynor

Co-director de proyecto: Dr. Abiud Flores Valentín

Mexicali, Baja California. Diciembre 2019

Índice

Capítulo 1: Introducción	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	4
1.3 Planteamiento del Problema	5
1.3.1 Posible Solución	5
1.3.2 Características del Monitor:	5
1.4 Preguntas de Investigación	6
1.5 Objetivo	7
1.6 Hipótesis	7
Capítulo 2: Marco teórico	7
2.2 Planteamiento del problema	9
2.3 Método	9
2.3.1 Diseño mecánico	10
2.4 Resultados	11
2.5 Discusión	15
3. Conclusiones	15
Referencias	16

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes

La manufactura avanzada basada en la automatización y robótica industrial está migrando a un entorno inteligente basado en datos. Estos datos se generan a partir del proceso industrial, el negocio y las personas involucradas en la organización. El presente documento aborda el tema del desarrollo de instrumentación biomédica de bajo costo en el contexto de la industria 4.0, que se puede definir como la tecnología asequible orientada a las personas que laboran en la industria.

Nuestro proyecto se basa en el desarrollo de un dispositivo capaz de medir temperatura corporal y frecuencia cardíaca exclusivamente en una persona mientras realiza su jornada laboral, con el propósito de llevar un registro de estas mediciones y enviar una alerta si alguna de estas mediciones se encuentra fuera de los límites aceptados. Para analizar esta problemática es necesario mencionar sus causas. Una de ellas es la enfermedad cardiovascular.

Los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), presentan que durante el 2017, las principales causas de muerte tanto para hombres como para mujeres fueron las enfermedades del corazón, la diabetes mellitus y los tumores malignos. Estudios han demostrado, que los factores de riesgo psicosocial como el estrés y el exceso de carga laboral pueden detonar condiciones para el desarrollo de enfermedades cardiovasculares (Juárez, 2007).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), las enfermedades cardiovasculares (ECV) son desórdenes del corazón y de los vasos sanguíneos, y se han convertido en la principal causa de muerte en todo el mundo.

Del total de defunciones por ECV, según la OMS, más de tres cuartas partes se producen en los países de ingresos bajos y medios.

En México, las enfermedades del corazón representaron casi 20% de las defunciones totales en el país en 2015, de acuerdo con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI),

La Ley Federal del Trabajo de México, en su artículo 512, señala que las organizaciones deben brindar las condiciones necesarias para evitar riesgos de salud

en el trabajo y se aseguren las condiciones de vida y salud de sus trabajadores. De la misma manera, en 2018 se publicó la Norma Oficial Mexicana 035 STPS que permite “identificar riesgos psicosociales en los centros de trabajo que pueden poner en riesgo la salud de los trabajadores” (Diario Oficial de la Federación, 2018, párr. 14).

La finalidad del proyecto es crear un dispositivo económico y confiable capaz de ayudar a prevenir accidentes cardiovasculares de manera que la persona pueda ser atendida a tiempo.

1.2 Justificación

En la actualidad existe una diversidad de sistemas de instrumentación biomédica en el mercado, ofreciendo al usuario estadísticas sobre su ritmo de vida y metas para mantener una vida saludable. Sin embargo, no existen dispositivos biomédicos de bajo costo dirigido a trabajadores del sector industrial, los cuales permiten llevar un historial médico de los empleados y prevenir posibles accidentes cardiovasculares durante el horario laboral.

Para que las empresas puedan evitar este tipo de tragedias, es necesario crear un artefacto capaz de medir distintos parámetros biométricos y, con base en los resultados, predecir un posible accidente relacionado a las enfermedades cardiovasculares y actuar de inmediato.

Por esta razón, se busca implementar un dispositivo que ayude a mejorar la calidad de vida de los empleados y a llevar un mejor control de su salud y estabilidad laboral.

Otros dispositivos que se encuentran actualmente en el mercado no ofrecen el monitoreo adecuado para el empleado ya que no se conecta en tiempo real con una base de datos matriz en donde puedan ser monitoreados los biométricos por una persona especializada en la seguridad y bienestar de los trabajadores, así como no poseen características especiales de durabilidad, resistencia y eficacia de monitoreo necesarias para cubrir el tiempo destinado de uso para jornadas laborales en ambientes poco favorables, pocos dispositivos integran todas las características necesarias y no son pensados para el mercado laboral, así mismo, la mayoría de los dispositivos están adecuados para el uso comercial y deportivo.

Si el personal especializado contase con un dispositivo que le entregara datos confiables del comportamiento del empleado durante su jornada laboral, este podría evaluar con mayor rapidez y facilidad su condición física, por lo que en base a los resultados podría tomar las medidas adecuadas y actuar con precisión, tomando en cuenta que sería totalmente personalizado a la evaluación y análisis de los datos registrados, permitiendo así, contar con un empleado con buena salud que le permita laborar íntegramente, beneficiando la productividad general de la empresa.

El hecho de contar con el dispositivo podría ayudar a evitar problemas legales de índole médico a las empresas, resguardando y conociendo los datos recolectados de sus empleados.

1.3 Planteamiento del Problema

No existen dispositivos biomédicos de bajo costo dirigido a trabajadores del sector industrial, los cuales permitan llevar un historial médico de los empleados y prevenir posibles accidentes cardiovasculares durante el horario laboral.

1.3.1 Posible Solución

Sistema de monitoreo de funciones vitales de bajo costo en donde se permita evaluar los efectos ambientales y de exposición a esfuerzos a los empleados del sector industrial para el control de riesgos en su salud. Este sistema es una solución basada en tecnología que ya existe y que requiere adaptarse para ser usada en una población específica y con un sistema de reporte accesible y fácil de leer para la gerencia.

Mediante un análisis predictivo en base al historial del trabajador, determinar si es apto para seguir laborando en los próximos días del momento en el que se presentó la irregularidad detectada.

1.3.2 Características del Monitor:

Se busca que el dispositivo sea lo menos invasivo posible para el portador, de esta forma le permita realizar sus tareas diarias sin contratiempo, además, cuente con características hipoalérgicas.

Partes existentes:

- Actígrafo (dispositivo)
- Registro a un dispositivo electrónico vía Wi-Fi.

Partes faltantes:

- Sistema para la portación de dispositivo, que permita:
- Uso ininterrumpido.
- Comodidad al usarse.
- Material no alergénico y resistente al agua, humedad, golpes, cambio de temperatura.

Software:

- Fácil de leer.
- Almacenar largos periodos de observación.
- Capacidad para generar graficas.
- Que se pueda cruzar con información clínica.

Lecturas requeridas:

- Frecuencia cardiaca.
- Temperatura.

1.4 Preguntas de Investigación

- ¿Es posible desarrollar un artefacto ergonómico y funcional para empleados del sector industrial?
- ¿Existe en el mercado un dispositivo para la lectura de biométricos de código abierto para el registro de datos de empleados del sector industrial?
- ¿El Internet de las cosas es adecuado para poder conectar este dispositivo a la nube y crear un sistema inteligente con el historial médico del empleado?

1.5 Objetivo

Diseñar un dispositivo confiable y económico que coadyuve a la seguridad del empleado en términos de salud. En este contexto, el proyecto permite la rápida asistencia médica en caso de una emergencia en el ambiente laboral, mejorando no sólo la salud y bienestar del trabajador, sino también progresando la imagen corporativa de la empresa entre trabajadores y la sociedad en general.

El personal de seguridad e higiene de la empresa obtendrá un registro automático del estado de salud del empleado, así como graficas de ritmo cardiaco, temperatura y oximetría. Mediante este dispositivo el personal calificado, podrá tener acceso a la información y permitirá observar el comportamiento de la persona y de su estabilidad de manera sencilla en un registro personalizado en una base de datos amigable para el usuario, donde se podrán ver las gráficas y el registro de la persona de cada variable capturadas durante su jornada laboral, así como, el monitoreo de actividad en tiempo real.

1.6 Hipótesis

Es factible desarrollar un dispositivo inalámbrico que permita monitorear funciones vitales en empleados del área industrial y que sea útil para detectar una situación de peligro en su salud; así mismo para la valoración médica en caso de detectarse una irregularidad en las mediciones.

Capítulo 2: Marco teórico

La industria 4.0 se basa principalmente en tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT). Esta tecnología tiene la capacidad de enviar y recibir una amplia variedad de información en tiempo real. Debido a estos avances tecnológicos se han desarrollado ya sistemas de monitoreo de la salud, pero a un costo elevado para ciertos sectores de la población. En cuanto al impacto del IoT en el sector salud, Obaidat, Rana, Maitra, Giri y Dutta (2018) afirman que el monitoreo en tiempo real de los pacientes “es posible conectando diferentes sensores para medir la temperatura corporal, la presión arterial y la respuesta cardíaca” (p. 479) de manera que el análisis de los datos pueda llegar a un dispositivo y emitir una alerta cuando algún parámetro se encuentre fuera de los límites aceptables. Los recientes avances en

microtecnología, procesamiento de datos, comunicación inalámbrica y capacidad de la batería han dado lugar a la proliferación de dispositivos portátiles no invasivos, como FitBit cuyo costo oscila en \$1480 pesos y que además, “se integran perfectamente con el teléfono inteligente del usuario y se pueden usar para medir múltiples señales relacionadas con la salud en una vida de libre ambiente” (Klepin, Wing, Higgins, Nichols y Godino, 2019, párr. 8). Sin embargo, no existe una plataforma de bajo costo y de fácil acceso orientada a la población que labora en el sector industrial como medida de seguridad y prevención de accidentes que pongan en riesgo la salud cardiovascular.

La Ley Federal del Trabajo de México, en su artículo 512, señala que las organizaciones deben brindar las condiciones necesarias para evitar riesgos de salud en el trabajo y se aseguren las condiciones de vida y salud de sus trabajadores. De la misma manera, en 2018 se publicó la Norma Oficial Mexicana 035 STPS que permite “identificar riesgos psicosociales en los centros de trabajo que pueden poner en riesgo la salud de los trabajadores” (Diario Oficial de la Federación, 2018, párr. 14).

En adición, los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), presentan que durante el 2017, las principales causas de muerte tanto para hombres como para mujeres fueron las enfermedades del corazón, la diabetes mellitus y los tumores malignos. Estudios han demostrado, que los factores de riesgo psicosocial como el estrés y el exceso de carga laboral pueden detonar condiciones para el desarrollo de enfermedades cardiovasculares (Juárez, 2007). A la fecha no existen soluciones tecnológicas de bajo costo que permitan monitorear biométricos como ritmo cardíaco, temperatura y movimiento de los trabajadores en la industria. La implementación de estos dispositivos permitiría monitorear en tiempo real los parámetros más críticos en la salud de las personas, generar datos estadísticos y alarmas para el personal de seguridad industrial y médico de la empresa. El análisis de los datos puede derivar en la creación de programas eficaces de salud para el personal de los centros de trabajo. La tecnología basada en sensores, IoT y analítica de datos permiten explorar y analizar una gran cantidad de datos de las personas mejorando la atención del paciente y reduciendo costos (Raghupathi, 2014).

2.2 Planteamiento del problema

En las últimas décadas, México ha tenido un crecimiento importante a nivel industrial, aumentando exponencialmente el número de industrias maquiladoras y generando nuevas oportunidades de empleo, donde el personal comprometido y capacitado es fundamental. Sin embargo, los ambientes laborales sometidos a altas temperaturas, en adición con el estrés laboral, aumentan el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares, de forma que repercuten en el bienestar físico y económico del trabajador. Es preciso desarrollar un sistema de instrumentación biomédico orientado a los trabajadores de la industria que permita monitorear los cambios de temperatura corporal y de la frecuencia cardíaca, de forma que los datos sirvan de indicativo ante una posible cardiopatía y pueda ser atendida lo más rápido posible, ya que en la actualidad no existen dispositivos orientados a este tipo de población. Por esta razón es que resulta relevante desarrollar este dispositivo y sentar las bases para abrir camino a la tecnología 4.0 en el sector industrial. Aunque esta tecnología ya existe, consideramos que hay un sector de la población que se debe beneficiar de estos avances tecnológicos. Además, consideramos que el desarrollar un dispositivo de bajo costo, permitirá a las organizaciones implementarlo a nivel de piso de producción.

2.3 Método

El sistema de monitoreo de biométricos se ejecutó en 4 fases:

1. Caracterización de sensores biométricos. En esta etapa se seleccionaron los sensores para medición de temperatura y ritmo cardíaco bajo un amplio estudio de las características de cada sensor para la conexión e integración del sistema de instrumentación biomédica.
2. Diseño de sistema de instrumentación e integración de sistema electrónico.
3. Desarrollo de Programa para Conexión a Red Industrial bajo el contexto de Industria 4.0
4. Diseño mecánico de sistema para medición de biométricos.
5. Pruebas experimentales y análisis de datos.

2.3.1 Diseño mecánico

El diseño mecánico del sistema de instrumentación biomédica fue realizado en el software Solidworks. Se creó el esquema de la carcasa, la cubierta superior y la tapa lateral para el acceso a la batería (Figura 1). Se observa en los distintos ángulos los elementos que componen a la carcasa: la puerta lateral desmontable para el acceso a la batería, la cubierta superior y los orificios para que corresponden al acceso a la batería, la interfaz de sensor de temperatura, el interruptor de encendido/apagado y el orificio para el puerto mini USB.

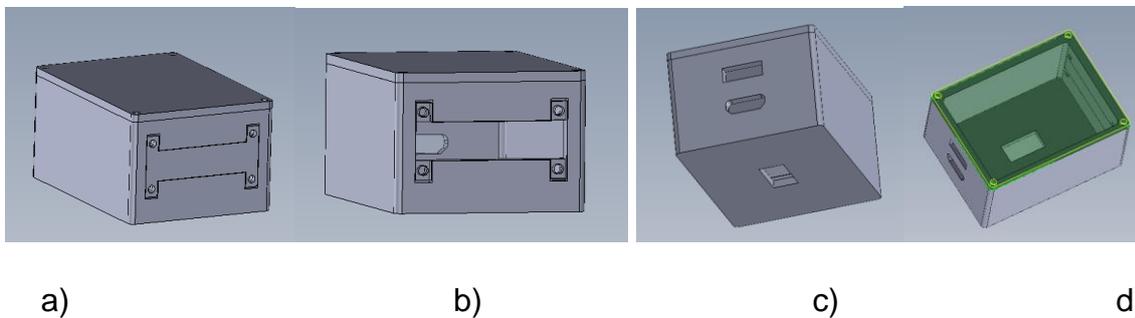


Figura 1: Modelo de carcasa para el sistema de instrumentación biomédica: a) vista isométrica con tapa para el acceso a la batería y la cubierta superior integrados, b) vista lateral con la cubierta superior y sin la tapa para el acceso a la batería, c) vista inferior con orificio para interfaz de sensor de temperatura y orificios para el interruptor de encendido/apagado y para puerto mini USB, d) vista superior para la cavidad del circuito electrónico. Fuente: Elaboración propia.

Posterior al diseño se realizó la impresión 3D del modelo (Figura 2), a manera de prototipo para la ejecución de pruebas. El prototipo se imprimió con filamento PLA en una impresora 3D marca DREMEL modelo 3D40

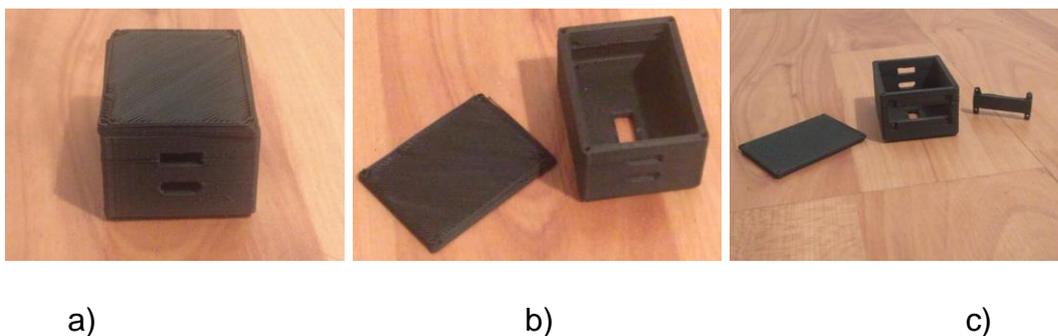


Figura 2: Prototipo impreso en 3D para el sistema de instrumentación biomédica: a) carcasa con la cubierta superior, b) cubierta superior y carcasa, c) cubierta superior, carcasa y puerta lateral para el acceso a la batería. Fuente: Elaboración propia.

2.4 Resultados

Se caracterizaron y simularon los sensores de temperatura TMP36 en computadora y se realizaron pruebas de laboratorio. El sensor de temperatura mostró un comportamiento lineal para un rango de temperaturas que van desde los -40 a los 125 grados centígrados.

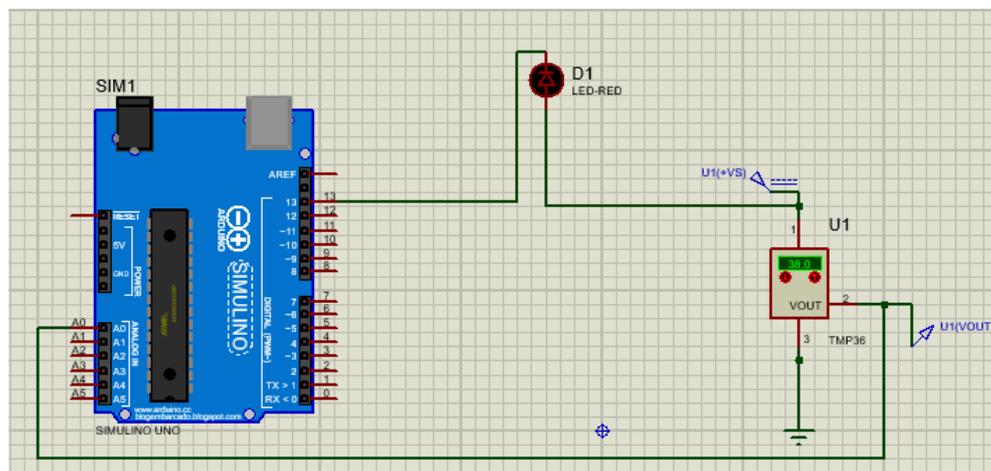


Figura 3: Diagrama circuital para el sensor de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

El microcontrolador seleccionado para las pruebas de laboratorio incorpora un convertidor analógico digital que convierte la lectura del sensor a una palabra digital de 10 bits. Posteriormente, este voltaje se utiliza para calcular la temperatura corporal en tiempo real. Las ecuaciones que describen el proceso se muestran a continuación:

$$V_T = P_d * 3.22 \text{ mV}$$

$$T_C = 100 * V_T - 50$$

donde:

V_T es el voltaje que suministra el sensor de temperatura en milivoltios.

P_d es la palabra digital de 10 bits producto del proceso de conversión analógico-digital.

T_C es la temperatura en grados centígrados registrada en el proceso de medición.

Para el sensor de ritmo cardiaco, se utilizó el sensor MAX30102, el cual incorpora además un módulo de oximetría de pulso, en conjunto con el monitor de frecuencia cardiaca. El MAX30102 funciona con una sola fuente de alimentación de 1.8V y una fuente de alimentación separada de 3.3V para los LED internos. La comunicación es a través de una interfaz estándar compatible con I2C. El módulo se puede apagar mediante un software con corriente de espera cero, lo que permite que los rieles de alimentación permanezcan alimentados en todo momento.

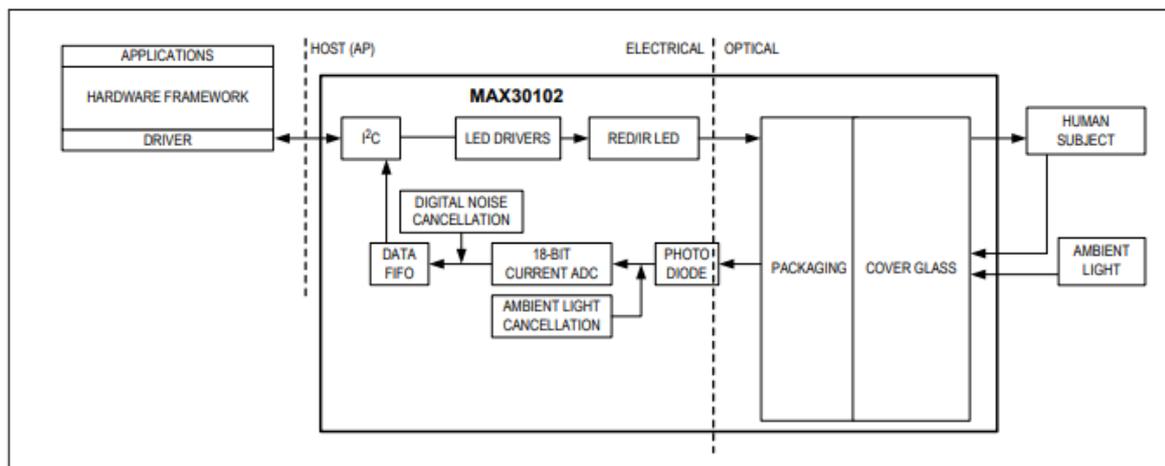


Figura 3: Diagrama del sistema. Fuente: Maxim Integrated Products (2018).

El dispositivo mantiene un tamaño de solución muy pequeño sin sacrificar el rendimiento óptico o eléctrico (Figura 3). Se requieren componentes mínimos de hardware externo para la integración en un sistema portátil. El MAX30102 es completamente ajustable a través de registros de software, y los datos de salida digital se pueden almacenar en un registro FIFO (primer dato que entra es el primero que sale) de 32 profundidades dentro del circuito integrado. FIFO permite que el MAX30102 se conecte a un microcontrolador o procesador en un bus compartido, donde los datos no se leen continuamente desde los registros del MAX30102.

La arquitectura del sistema se muestra en la Figura 4. El sistema se desarrolló con base en dos sensores: temperatura y ritmo cardiaco. Sin embargo, la arquitectura permite la incorporación de un mayor número y tipo de sensores, dependiendo del número de entradas del microcontrolador IoT. La acción de incrementar el número de sensores elevaría el costo del sistema de instrumentación biomédica. El microcontrolador IoT tiene la capacidad de conectarse a la red interna de la organización (intranet) y de esta forma mandar datos a un servidor que almacenará los datos biomédicos en una base de datos dedicada para este propósito. La transferencia de datos se realiza en la red interna de la organización o empresa asegurando las condiciones de seguridad de la información. En nuestro modelo, los datos no se almacenan en ninguna nube pública. Sobre el servidor y la base de datos se montó un servicio de monitoreo en tiempo real de temperatura y ritmo cardiaco.

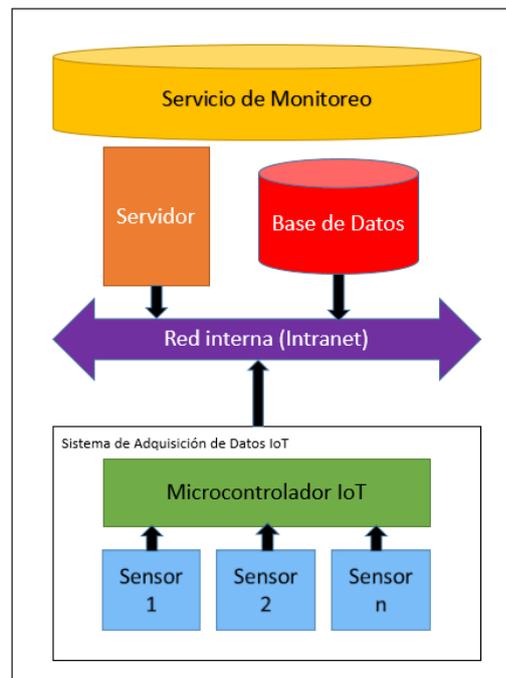


Figura 4: Arquitectura del sistema. Fuente: Elaboración propia.

El software se compone de 3 partes esenciales: servidor (host), cliente (dispositivo), pantalla de monitoreo (aplicación web). El servidor se implementó mediante Node JS y el framework de Express con el propósito de crear una infraestructura ligera y sencilla de escalar en caso de agregar nuevos sensores al dispositivo. Aunado a esto, se utilizó el módulo Socket.IO para la comunicación en tiempo real como alternativa más sencilla y amigable a la implementación de

WebSockets tradicionales, SSE (Server Sent Events), o servicios privados de eventos RTC (Real Time Communication).

El cliente (dispositivo microcontrolador IoT: WEMOS/Arduino) se encarga de publicar datos de temperatura y ritmo cardiaco en formato JSON a la ruta: /datos/sensores/:sensor, y el servidor previamente descrito inserta este documento (registro) a una Base de Datos No Relacional (MongoDB) donde existen 2 colecciones: "Registros" y "Usuarios", en la cual se encuentran las personas registradas para monitoreo de biométricos. Los datos se muestran a manera de listado en la sección principal (root) de la aplicación web tal como se muestra en la Figura 5.

Además de almacenar la información en el histórico (base de datos) se emite un evento por parte del servidor para que la pantalla de monitoreo actualice la información proyectada tal como se muestra en la Figura 6.



Figura 5: Visualización de pantalla inicial de la aplicación, mostrando a los usuarios registrados.

Fuente: Elaboración propia.

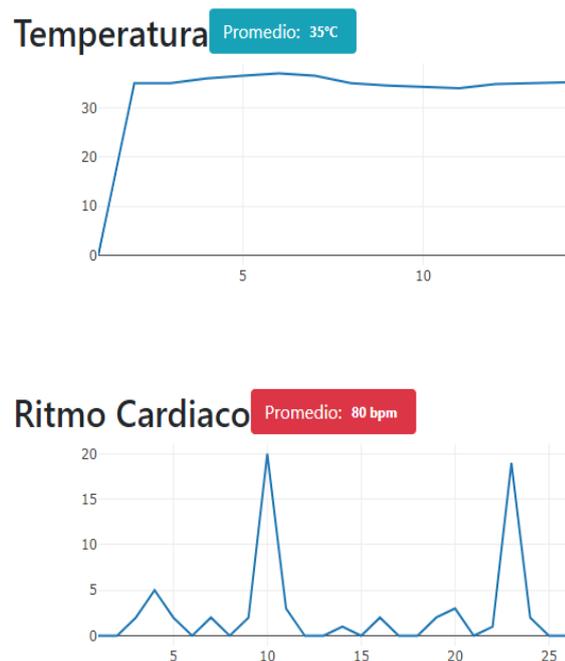


Figura 6: Pantalla de visualización de los sensores de biométricos en tiempo real.

Fuente: Elaboración propia.

2.5 Discusión

El proceso de simulación, caracterización e integración de sensores de temperatura y ritmo cardíaco se realizó de forma exitosa. Las pruebas de laboratorio demostraron que es posible integrar estos módulos en un sistema de instrumentación biomédica cuyo costo oscila los \$225 pesos. Este costo es mucho menor que los sistemas comerciales como *Fitbit* y *Apple Watch* lo que permite que las organizaciones tengan la posibilidad de implementar esta tecnología para el cuidado de la salud de sus empleados. El sistema puede servir como un instrumento para muestrear las señales de temperatura y ritmo cardíaco de un grupo de personas que durante su día laboral pudieran estar sujetas a situaciones de esfuerzo físico excesivo o que disparen condiciones nocivas para su salud.

El sistema de instrumentación desarrollado en este proyecto puede servir como apoyo para realizar un diagnóstico a grupos grandes de personas que laboran en una organización que pudieran estar sujetas a riesgos ergonómicos, psicosociales o cargas de trabajo que excedan las capacidades físicas del trabajador. Todas estas condiciones se describen en la Norma Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018 (2018).

3. Conclusiones

El personal es el recurso más importante de una empresa, por ello se buscó implementar un dispositivo que permita el monitoreo en tiempo real de sus datos biomédicos; de esta forma se puede controlar la salud y bienestar de cada individuo en piso de producción que esté sometido a esfuerzos mayores o condiciones ambientales y ergonómicas desfavorables.

La tecnología debe estar al servicio de la sociedad, por lo que aplicando este concepto a la seguridad industrial obtendremos un sin número de beneficios y un magno impacto en la salud de los empleados.

El desarrollar este dispositivo a bajo costo, permite que sea accesible para las empresas, para su implementación total en operaciones y así mismo, identificar riesgos psicosociales en su centro de trabajo que puedan poner en riesgo la salud de los trabajadores.

Futuros trabajos en esta línea de investigación estarán relacionados al uso de tecnología IoT y de Industria 4.0 para diagnosticar riesgos en el centro de trabajo de acuerdo a la Norma Mexicana NOM-035-STPS-2018. Una fase posterior de este proyecto de investigación será evaluar el impacto de las tecnologías en las personas.

Referencias

- Diario Oficial de la Federación. (2018). NORMA Oficial Mexicana NOM-035-STPS-2018: factores de riesgo psicosocial en el trabajo-Identificación, análisis y prevención. En *SEGOB Secretaría de Gobernación*. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5541828&fecha=23%2F10%2F2018
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017) *Principales causas de mortalidad*. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/programas/mortalidad/>
- Juárez, A. (2007). Factores psicosociales laborales relacionados con la tensión arterial y síntomas cardiovasculares en personal de enfermería en México. *Salud Pública de México*, 49(2), 109-117. Recuperado de <https://www.medigraphic.com/pdfs/salpubmex/sal-2007/sal072e.pdf>
- Klepin, K., Wing, D., Higgins, M., Nichols, J. y Godino, J. (2019). Validity of cardiorespiratory fitness measured with Fitbit: compared to VO₂ max. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 17, 1-24. Recuperado de <https://insights.ovid.com/crossref?an=00005768-900000000-96596>
- Maxim Integrated Products. (2018). High-sensitivity pulse oximeter and heart-rate sensor for wearable health. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30102.pdf>
- Obaidat, M., Rana, S., Maitra, M., Giri, D. y Dutta, S. (2018). Chapter 19: biometric security and Internet of Things (IoT). *Biometric-Based Physical and Cybersecurity Systems*, 477-509. Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/328516514_Biometric_Security_and_Internet_of_Things_IoT

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). *Enfermedades cardiovasculares*. Recuperado de

[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))

Raghupathi, W. y Raghupathi, V. (2014). Big data analytics in healthcare: promise and potential. *Health Information Science and Systems*, 2(3), 1-10. doi:10.1186/2047-2501-2-3