

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

**DSc. Esteban Pino Quiroga**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de:

**Ingeniero Civil Biomédico**

## Sistema de Monitoreo Inalámbrico de Parámetros Fisiológicos para personas realizando Actividad Física

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:  
DSc. Esteban Pino Quiroga

# Sistema de Monitoreo Inalámbrico de Parámetros Fisiológicos para personas realizando Actividad Física



María Elena Muñoz Pineda

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

Ingeniero Civil Biomédico

Noviembre 2016

## Resumen

El monitoreo de variables fisiológicas de una persona durante la realización de actividad física ha tenido un gran auge en el último tiempo, pues permite mantener un registro de la evolución y cambios que se generan de éstas durante el ejercicio.

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar un sistema de monitoreo que permita medir variables fisiológicas de varias personas simultáneamente durante la realización de actividad física, en tiempo real. En este caso, esas variables corresponden a la frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, y los sensores escogidos para la medición son un monitor de frecuencia cardíaca Polar WearLink+ con Bluetooth y un oxímetro de pulso marca Nonin Medical Ipod 3211, respectivamente.

El software creado para la visualización de las variables fisiológicas se desarrolla en Python utilizando algunas de sus bibliotecas Open Source. Esta interfaz consta de una ventana principal donde es posible observar los valores de las variables sensadas para los distintos deportistas. También consta de una ventana donde es posible ver la base de datos con el registro de todos los pacientes y el historial de los valores fisiológicos sensados durante distintas sesiones de ejercicio. El sistema de monitoreo desarrollado permite, además, activar una serie de alarmas en caso de que los valores sensados presenten alteraciones a los valores normales establecidos inicialmente en la interfaz, así se da aviso del potencial riesgo en que se encuentra el deportista.

Para probar el funcionamiento del sistema se realizaron 6 pruebas a dos sujetos de sexo femenino, de 24 y 25 años. Estas mediciones se aplicaron durante la ejecución de distintos ejercicios lo que permitió observar que el software cumple con las necesidades y objetivos planteados. También se hicieron pruebas para obtener la distancia máxima en la que el sistema puede operar adecuadamente, que resultó ser de 4 metros, y la estimación de la cantidad de dispositivos que permiten un funcionamiento estable de éste, que fue de 7 sensores.

De acuerdo a estos resultados, se establece que el sistema de monitoreo desarrollado funciona adecuadamente. Sin embargo, se sugiere su utilización dentro de lugares cerrados, como un gimnasio o sala de entrenamiento, debido a las limitaciones de distancia de los sensores seleccionados.



"El mundo está en las manos de aquellos que tienen el coraje de soñar  
y correr el riesgo de vivir sus sueños".

**Paulo Coelho**

## Agradecimientos

A mi madre, por su infinita paciencia y amor. ¡No sabes cuánto te admiro! Espero que cuando tenga tantos años de trabajo como tú, mantenga el mismo ímpetu y entrega por mi labor, como tú la tienes hacia la tuya.

A mi padre. Gordito mío, no te imaginas la falta que me haces cada día. Gracias por todo lo que me entregaste siempre. Prometo ser una gran profesional y luchar por cumplir todos mis sueños y metas, sin rendirme jamás.

A mis LDS, gracias por el apoyo, el cariño, la confianza, la unión y la felicidad que siempre me entregan. No pudo tocarme una mejor familia. Los amo.

A los amigos y compañeros que compartieron esta travesía conmigo. Dani y Belén, gracias por su amistad incondicional, sigamos creando recuerdos y fortaleciendo esta amistad cada día. A mis amiguitos Britam, Chris y Marco, sin ustedes la universidad no habría sido lo mismo. Gracias por las risas infinitas, los juegos y bromas, por el apoyo y aguante, por esos tramos haciendo tareas, y por esos abrazos y conversaciones en los momentos en que más lo necesité.

Finalmente quiero agradecer a mis profesores, por sus enseñanzas, la orientación y experiencia que me brindaron durante mis años de carrera para convertirme en una Ingeniera Civil Biomédica. En especial, a mi profesor guía, Esteban Pino Quiroga, por su paciencia y comprensión.

# Tabla de Contenidos

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABREVIACIONES.....</b>	<b>IX</b>
<b>UNIDADES DE MEDIDA .....</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.2. ESTADO DEL ARTE .....	2
1.2.1 Trabajos Previos .....	2
1.2.2 Discusión .....	7
1.3. OBJETIVOS .....	8
1.3.1 Objetivo General .....	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	9
1.5. TEMARIO Y METODOLOGÍA.....	9
<b>CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA.....</b>	<b>10</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	10
2.2. SISTEMA DE MONITOREO.....	10
2.2.1 Sistema de Adquisición de datos.....	11
2.2.2 Sistema de Visualización.....	11
<b>CAPÍTULO 3. SELECCIÓN DE SENSORES BIOMÉTRICOS .....</b>	<b>13</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	13
3.2. SENSOR DE SATURACIÓN DE OXÍGENO .....	13
3.3. SENSOR DE FRECUENCIA CARDÍACA.....	15
<b>CAPÍTULO 4. INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN DEL SISTEMA.....</b>	<b>18</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	18
4.2. INTERFAZ DEL USUARIO .....	18
4.3. BASE DE DATOS .....	27
<b>CAPÍTULO 5. PRUEBAS DEL SISTEMA Y RESULTADOS .....</b>	<b>33</b>
5.1. PRUEBA EN PERSONAS REALIZANDO ACTIVIDAD FÍSICA.....	33
5.1.1 Medición en Reposo.....	33
5.1.2 Medición en Actividad Física.....	33
5.1.3 Simulación de Condiciones de Alarma .....	35
5.2. PRUEBAS DE RENDIMIENTO DEL SISTEMA.....	35
5.2.1 Pruebas de distancia.....	35
5.2.2 Rendimiento del computador.....	36
5.2.3 Estimación de cantidad de dispositivos BT que soporta el sistema.....	37
5.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	38
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>40</b>
6.1. CONCLUSIONES .....	40
6.2. TRABAJO FUTURO .....	41
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>42</b>

## Lista de Tablas

TABLA 5.1 Resultados Obtenidos realizando ejercicio, sujeto 1 .....	34
TABLA 5.2 Resultados obtenidos realizando ejercicio, sujeto 2 .....	34
TABLA 5.3 Rendimiento de CPU al agregar sensores BT .....	37



# Lista de Figuras

Fig. 1.1 Funcionamiento de un oxímetro.....	4
Fig. 2.1 Esquema General del Sistema .....	10
Fig. 2.2 Interfaz gráfica del Sistema desarrollado.....	12
Fig. 3.1 Ubicación del sensor de saturación de oxígeno .....	14
Fig. 3.2 Paquete de datos enviados por Nonin Medical Ipod 3211.....	14
Fig. 3.3 Ubicación del sensor de frecuencia cardíaca en el cuerpo.....	16
Fig. 3.4 Esquema general del envío de datos de sensor de frecuencia cardíaca .....	16
Fig. 3.5 Paquete de datos enviados por Sensor Polar WearLink+ con Bluetooth.....	17
Fig. 4.1 Diagrama general del uso de la Interfaz .....	19
Fig. 4.2 Cuadro de ingreso de los datos del paciente .....	20
Fig. 4.3 Cuadro de ingreso de nuevo paciente .....	21
Fig. 4.4 Diagrama de configuración de la conexión de los sensores.....	22
Fig. 4.5 Ventana de confirmación de datos ingresados .....	23
Fig. 4.6 Visualización de datos y parámetros fisiológicos del paciente monitoreado.....	23
Fig. 4.7 Interfaz de Visualización del Sistema de Monitoreo en funcionamiento .....	25
Fig. 4.8 Ventana de configuración de valores para activación de alarma .....	26
Fig. 4.9 Ventana de alarma .....	27
Fig. 4.10 Ventana de base de datos .....	28
Fig. 4.11 Tabla con mediciones guardadas en la base de datos.....	29
Fig. 4.12 Filtrado de Datos de un Deportista.....	29
Fig. 4.13 Historial de una sesión de ejercicio específica del Deportista .....	30
Fig. 4.14 Ingreso de una nueva persona a la base de datos.....	31
Fig. 4.15 Eliminación de un registro de la base de datos .....	32
Fig. 5.1 Sujeto de prueba siendo monitoreado por el sistema .....	34
Fig. 5.2 Ventana de alarma desplegada en casos de mediciones anormales de SpO <sub>2</sub> .....	35
Fig. 5.3 Ventana de alarma desplegada en casos de mediciones sobre FC <sub>MAX</sub> .....	35
Fig. 5.4 Uso de CPU del sistema desarrollado durante la ejecución del programa .....	36



# Abreviaciones

## Mayúsculas

ECG	: Electrocardiograma
SaO <sub>2</sub>	: Saturación de Oxígeno Arterial
SpO <sub>2</sub>	: Saturación de Oxígeno Periférica
BT	: Bluetooth
FC	: Frecuencia Cardíaca
HbO <sub>2</sub>	: Oxihemoglobina
FCMAX	: Frecuencia Cardíaca Máxima
BR	: Baud Rate
INC	: Imagyn Medical Technologies
CSEM	: Swiss Center for Electronics and Microtechnology
FDA	: U.S. Food and Drug Administration

## Unidades de Medida

bpm	: Latidos por minuto (beats per minute)
min	: Minutos.
kg	: Kilogramo
nm	: Nanómetro
m	: Metro
v	: Volt
Mbit/s	: Megabit por segundo
bit/s	: Bit por segundo



# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Introducción General

El uso de sensores para el monitoreo de variables fisiológicas, durante la realización de actividad física, cada día cobra más importancia. El mantener un registro de los cambios que van surgiendo durante el ejercicio en las personas puede resultar muy útil en la rápida detección de alguna condición de potencial peligro que comprometa la salud, al detectar cambios anormales en los rangos asociados a cada parámetro y propios para cada deportista.

El estudio de estas variables fisiológicas data desde hace ya muchos años. Es así como en el año 1885 Fernand LaGrange publica el primer libro de texto sobre la Fisiología del Ejercicio. A partir de allí se ha desarrollado el monitoreo, en gran medida, enfocado al análisis de estas variables en deportistas. Entre otros personajes que han seguido este lineamiento está John S. Haldane quien desarrolló algunos métodos para medir los niveles de oxigenación durante el ejercicio [1][2].

Debido a la constante movilidad que la persona realiza durante la actividad física, cada vez se vuelve más necesario que los dispositivos que permitan medir estas variables sean pequeños y poco restrictivos al ejecutar los movimientos de los distintos ejercicios [3]. A este tipo de dispositivos, se les llama wearable y consisten en aparatos electrónicos que se posicionan en alguna parte del cuerpo realizando mediciones o cumpliendo una función específica. Otro gran requisito es que sean dispositivos inalámbricos, para evitar que el cableado entorpezca con la actividad desarrollada [4].

Actualmente, en el mercado existen algunos sensores que permiten realizar las mediciones de forma inalámbrica, como los monitores de frecuencia cardíaca Zephyr HxM Bluetooth Smart, Garmin Ant+ o Polar WearLink+ con Bluetooth. Sin embargo, hay otros parámetros importantes que no poseen dispositivos de medición especializados en el monitoreo durante la ejecución de deportes, donde el ruido, el sudor y el movimiento crean situaciones que dificultan la medición. Los datos captados por estos sensores pueden ser visualizados en aplicaciones instaladas en Smartphones, en Holter o en un computador. Sin embargo, estos están limitados a algunos biosensores en específico, principalmente de frecuencia cardíaca y temperatura.

Además del limitado desarrollo de sensores especializados en la medición bajo condiciones de deporte, también es posible percibir que existen pocos sistemas de monitoreo que permitan incluir la medición de estas variables de manera simultánea, integrando aquellas que no son

consideradas convencionalmente, como saturación de oxígeno, y recepcionando los parámetros medidos a los deportistas en un computador central, de modo que se obtengan datos confiables y precisos que ayuden al monitoreo en tiempo real de cada paciente.

## 1.2. Estado del Arte

### 1.2.1 Trabajos Previos

El monitoreo de variables fisiológicas se vuelve cada vez más importante, donde el mantener una observación constante de los signos vitales es primordial para registrar cambios, permitiendo así detectar algunas anomalías. Algunas de estas variables fisiológicas pueden ser la oximetría de pulso, frecuencia cardíaca, ritmo respiratorio, entre otros. Centrando la atención, principalmente en la frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, se procedió a realizar una investigación para conocer más a fondo en qué consiste la medición de estos parámetros.

#### ➤ Frecuencia Cardíaca

La frecuencia cardíaca (FC) es el número de veces que el corazón se contrae en una unidad de tiempo, se expresa en latidos por minuto o bpm (beats per minute, por su abreviación en inglés). Muchas veces suele confundirse con el ritmo cardíaco que es la sucesión regular de los latidos cardíacos, correspondientes a los sonidos de Korotkoff que se producen por la sístole y diástole del corazón. La confusión se debe a que en personas saludables el ritmo o pulso cardíaco se puede utilizar para medir la frecuencia cardíaca. [5].

Algunas zonas del cuerpo en que se puede obtener esta variable son en la muñeca, sobre la arteria carótida en el cuello, en el codo sobre la arteria braquial, sobre el pie, etc. La medición del pulso proporciona información importante acerca de la salud, pues algún cambio de la frecuencia cardíaca normal puede ser indicio de una afección [6]. La medición de este parámetro, por lo general, se realiza de manera manual, es decir, medir los latidos durante un minuto, ya sea en la muñeca o en el cuello sobre la carótida, repitiendo el proceso unas cuantas veces y promediando los valores obtenidos para asegurar un valor más preciso. Pero también se puede obtener a través de un pulsioxímetro u electrocardiograma (ECG).

Los valores normales de FC cambian de acuerdo a la persona, por lo que es muy importante conocer los rangos individuales para ir ejerciendo un monitoreo de estos. El rango de valores de la frecuencia cardíaca en reposo puede oscilar entre 60-100 bpm. En el caso de personas que practican deporte regularmente este rango puede ser entre 40-60 bpm. Ahora bien, durante la realización de ejercicio es importante considerar que la frecuencia cardíaca aumenta, pero no debe pasar de cierto límite para no afectar la salud de la persona. A este valor se le llama frecuencia cardíaca máxima y para cada persona es diferente, pero el valor estándar fijado se basa en la edad del paciente. Así la obtención de este parámetro se hace en base a la ecuación 1.1, la que entrega un valor teórico que puede ser usado como guía para calcular este dato. Si bien la fórmula utilizada no es exacta debido a su falta en la consideración de otros factores propios del deportista, tales como: su sexo, estado de salud o frecuencia cardiaca en reposo, es a la que se recurre mayormente en distintos sistemas de monitoreo [7][8].

$$FC_{MAX} = 220 - \text{edad} \quad (1.1)$$

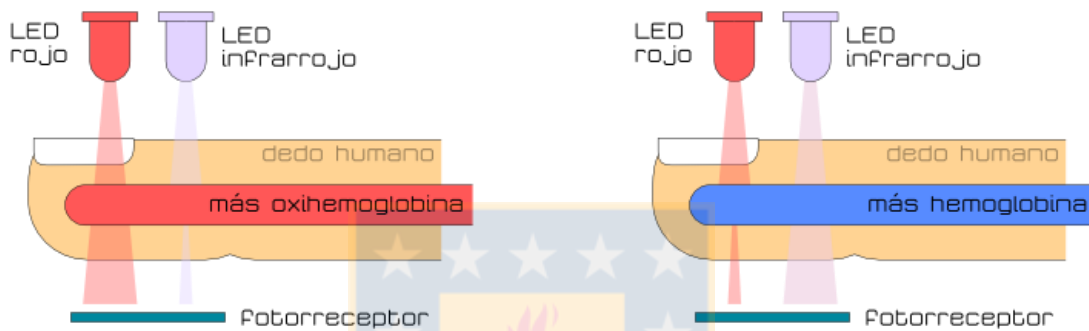
### ➤ Saturación de Oxígeno

El oxígeno, necesario para que el cuerpo realice sus funciones vitales, es transportado a través del torrente sanguíneo al estar disuelto y combinado con la hemoglobina, formando el complejo oxihemoglobina ( $HbO_2$ ). La forma de medir la cantidad de hemoglobina saturada con oxígeno que está presente en la sangre es a través de la saturación de oxígeno arterial o  $SaO_2$ . Los valores normales de  $SaO_2$  en una persona deberían encontrarse entre 95% y 100% para una persona sana [9].

El dispositivo más común utilizado para medir esta variable fisiológica es el oxímetro de pulso, el cual es una forma de medición no invasiva que permite obtener la saturación de oxígeno periférica a la que se llama  $SpO_2$ . La pulsioximetría, como también es llamada, es una técnica muy útil por su sencillez, rapidez, fiabilidad y reproductibilidad. Su utilización es cada día más masiva, tanto a nivel hospitalario como en la medicina primaria y ambulatoria. [10]

El principio de uso del oxímetro consiste en un dispositivo que se posiciona comúnmente en el dedo o lóbulo de la oreja del paciente. Este posee un transductor con dos piezas: un emisor de luz roja e infrarroja, cuyas longitudes de onda son de 660 nm y 940 nm, respectivamente, y un fotodetector. Los rayos de luz roja e infrarroja son lanzados a través de la piel, y son absorbidos en

distintas intensidades tanto por la hemoglobina como la  $HbO_2$ . La variación de luz es captada por un fotoreceptor desde el cual se pueden extraer estos valores para realizar un procesamiento mediante la comparación de la luz que absorbe durante la onda pulsátil con respecto a la absorción basal, calculando el porcentaje de oxihemoglobina en venas y capilares en el resultado. Los datos entregados corresponden a la saturación de oxígeno, frecuencia cardíaca y curva de pulso. En la Figura 1.1 se ve un esquema del funcionamiento del oxímetro. [11][12]



**Fig. 1.1 Funcionamiento de un oxímetro** [<http://polaridad.es/monitorizacion-sensor-pulso-oximetro-frecuencia-cardiaca/>].

Existe otro tipo de oxímetro en el cual la obtención de  $SpO_2$  es realizada por reflectancia. Allí, se emite una luz de incidencia que pasa a través de la piel y es reflejada por los tejidos subcutáneos y huesos para ser captada por un fotodetector ubicado al lado de los emisores de luz. Permite realizar mediciones en áreas del cuerpo en donde el método por transmitancia no es posible de llevar a cabo. Las zonas más usadas para realizar este tipo de medición son en la frente, tórax o dorso de la mano [13].

La observación de estas variables fisiológicas bajo condiciones de actividad física va tomando cada vez más importancia para ir manteniendo registros de los avances y cambios que se producen en la persona bajo distintas cargas de ejercicio. También es útil para monitorear condiciones y valores anormales, evitando así la sobre exigencia del deportista, o detectar a tiempo algún cuadro que ponga en riesgo su vida. Poco a poco se han ido creando sensores que permiten medir con gran precisión los parámetros físicos, y al mismo tiempo asegurar una buena movilidad al paciente, además de comodidad y seguridad, facilitando sus características wearable [3].

Otro requisito que toma cada vez más relevancia es el uso de la tecnología wireless, es decir, la transmisión inalámbrica de los datos. Esto permite que la cantidad de cables para la conexión entre los sensores y los dispositivos de visualización desaparezcan o disminuyan notoriamente, lo que facilita que el deportista pueda moverse con gran facilidad, realizando los ejercicios libremente, sin riesgo de enredarse o dificultar su actividad. Además, el uso de tecnología inalámbrica permite que no sólo se aplique al monitoreo, sino que al entrenamiento atlético. En este caso, se puede crear un protocolo de tolerancia considerando los posibles límites que debe tener el deportista en su actividad física y que le avise cuando este umbral sea alcanzado, evitando lesiones y cuadros de riesgo [4]. También se puede implementar aplicaciones que permitan dar aviso al usuario en caso de que las variables fisiológicas estén por sobre o bajo el nivel de los rangos normales de la persona, previniendo una urgencia.

En el caso de los monitores de frecuencia cardíaca, en el último tiempo, han surgido una serie de dispositivos presentados en forma de reloj de pulsera, poleras o bandas elásticas para el pecho, que miden este parámetro y lo envían de manera inalámbrica a una determinada estación de trabajo para ser visualizado, que por lo general es un Smartphone. Según algunos estudios realizados a dispositivos de frecuencia cardíaca de reconocidas marcas, se comprobó la precisión de los sensores al comparar las mediciones obtenidas por estos con las de un ECG. Estos estudios utilizan la correlación entre los valores recogidos a través de estas mediciones como criterio de validación, donde  $r=0.99$  ( $p<0.0005$ ) al medir bajo condiciones de reposo, y  $r=0.97$  ( $p<0.0005$ ) en condiciones de trote. Los resultados indican que hay una fuerte correlación entre los datos, concluyendo que no existe diferencia significativa entre las mediciones llevadas a cabo con el sensor de FC y el ECG. [14]. Además se demuestra que presentan un bajo número de artefactos en su medición, mostrando un buen criterio para su validación y confiabilidad [15].

La medición de la oximetría de pulso en actividad física, por su parte, presenta grandes limitaciones. El método convencional para obtener los niveles de  $SpO_2$  mediante el oxímetro o pulsioxímetro restringe al deportista en la realización de ciertos movimientos debido al posicionamiento de los sensores tanto en el dedo o lóbulo de la oreja del paciente, pues si se quisieran llevar a cabo actividades en que se requiera utilizar las manos o realizar ejercicios más bruscos, se generan ruidos en la medición de los sensores. Por otro lado, el método para la medición de la oximetría de pulso por reflectancia permite realizar mediciones en áreas del cuerpo en donde el método por transmitancia no es posible de llevar a cabo. Las ventajas que presenta esta última por sobre la oximetría convencional es que este sensor es plano y se puede poner sobre la piel como un

adhesivo tanto en la frente, tórax o dorso de la mano del paciente, lo que facilita la realización de ciertos ejercicios, dejando las extremidades libres para hacer cualquier actividad. Además, bajo condiciones donde la circulación periférica es pobre, es probable tener mejores lecturas que con el sensor convencional [16].

A pesar de que la revisión bibliográfica sobre la precisión de la saturación de oxígeno es abundante, esto se realiza considerando mediciones en reposo. Si se analiza su monitoreo durante la ejecución de ejercicio, es más difícil encontrar información puesto que no está ampliamente desarrollada. Dentro de lo encontrado, hay estudios que detallan que algunas de las particularidades que tiene la medición de SpO<sub>2</sub> durante el ejercicio es que para distintos pulsioxímetros, el nivel de precisión va a variar, siendo más preciso en los rangos de saturación más altos y sobre estimando en los rangos bajos. Además, la selección del lugar donde se realizará la medición (lóbulo de la oreja, frente, punta del dedo) es otra de las grandes dificultades que condicionan la precisión de estos sistemas, pues se debe elegir una zona que restrinja lo menos posible la movilidad de la persona, pero que a su vez entregue datos con el menor ruido posible [17].

Una de las aplicaciones de este trabajo de gran interés es el monitoreo de algunos parámetros fisiológicos, como la oximetría de pulso o la frecuencia cardiaca, durante la realización de ejercicios en altura. Estas requieren una atención particular, debido a las peculiaridades en las condiciones de medición, como por ejemplo, las bajas temperaturas que afectan la obtención de la SpO<sub>2</sub> en la punta del dedo o lóbulo de la oreja, o los artefactos que se generan en la señal producto del movimiento de la persona, los que requieren un algoritmo de procesamiento más complejo. En el comercio son escasos los dispositivos que permiten monitorear el SpO<sub>2</sub> de manera confiable y cumpliendo con la precisión requerida, durante la realización de ejercicios.

Estudios e investigaciones han buscado desarrollar prototipos que permitan medir ECG, respiración, SpO<sub>2</sub> y señales de actividad mediante sensores integrados a una polera. Ahí la SpO<sub>2</sub> se mide en el pecho, favoreciendo el monitoreo de manera cómoda y no invasiva de los parámetros fisiológicos en condiciones de altura, mientras se realizan ejercicios. Los resultados de estos han mostrado que es una buena solución para el control de las variables fisiológicas, cumpliendo con las condiciones de comodidad. Los datos medidos también arrojan resultados aceptables, sin embargo, se cree necesario seguir con el desarrollo de un algoritmo aún más sofisticado para mejorar el rendimiento [18].

Un equipo de Imagyn Medical Technologies (INC) [19] desarrolló un oxímetro de pulso que funciona sobre superficies planas utilizando un método propio de reflexión de la luz para el

monitoreo de pacientes adultos hospitalizados. Este fue aprobado en la frente de los pacientes, por la U.S. Food and Drug Administration (FDA), y además se buscará las aprobaciones para la colocación en el pecho y espalda de pacientes.

También, por parte del Swiss Center for Electronics and Microtechnology (CSEM) [21] se está explorando la confiabilidad de realizar la medición de la saturación de oxígeno a la altura del esternón, utilizando un sensor confeccionado con 16 canales de fotopletismografía. Los resultados han arrojado que la perfusión de la sangre a la altura del esternón depende de la posición del sensor, haciendo que la medición de estos canales entreguen distintos valores para un mismo individuo [20]. Este sensor del CSEM se ha desarrollado con el objetivo de medir el  $SaO_2$  en otras zonas diferentes a la punta del dedo, de modo de aumentar el campo de aplicación de la oximetría de pulso. Los principales blancos son en la utilización en misiones espaciales, para trabajadores de emergencias como de operaciones de rescate, bomberos y salvavidas. Es así que durante los últimos años se han unido distintos grupos para el diseño de este dispositivo como: European Space Agency, Sensation EU-project, Biotex EU-project and HeartCycle EU-project.

Otros dos estudios encontrados, indican que la medición de la  $SaO_2$  en el esternón protege la medición frente a factores ambientales, permitiendo sensar para situaciones especiales, como trabajadores en ambientes complicados o deportistas que realicen ejercicios al aire libre, incluyendo montañistas de gran altura. Sin embargo, esta es una zona de baja irrigación y perfusión por lo que los algoritmos comunes para procesar los datos entregados por el oxímetro no dan estimaciones confiables. Para solucionar esto se utiliza la pletismografía multicanal, usando el prototipo del sensor desarrollado por el CSEM junto con un algoritmo basado en la estimación frecuencial del ruido de modo de eliminarlo y obtener mediciones en condiciones de baja perfusión sanguínea. Los resultados encontrados son aceptables, pero aún necesitan desarrollarse más para lograr una validación [22][23].

## 1.2.2 Discusión

La revisión bibliográfica realizada muestra la importancia de la medición de las variables fisiológicas durante la realización de ejercicio físico, la cual cobra gran relevancia debido a que permite observar en tiempo real las condiciones físicas de la persona, pudiendo evitar alguna afección que comprometa su salud, de manera rápida e inmediata.

Debido al gran uso de dispositivos encargados de medir estos signos vitales, cada día va tomando mayor relevancia su rápido desarrollo, sobre todo al momento de considerar aparatos



inalámbricos. La particularidad de estos está en que, debido al movimiento realizado durante la actividad física por la persona, las señales enviadas a las centrales de visualización contienen más ruido y presentan una mayor alteración, lo que hace que sea necesario desarrollar algoritmos más complejos para el procesamiento de éstas.

En el mercado existen algunos dispositivos enfocados en medir variables fisiológicas en el deporte, como sensores de frecuencia cardíaca. Estos están probados y certificados, asegurando la obtención precisa de la variable medida. En cuanto a la medición de la saturación de oxígeno es más difícil encontrar dispositivos que permitan medir esta variable durante la ejecución de ejercicios. Si bien existen unos pocos equipos, la mayoría de estos son a modo de pinzas para el dedo, lo que lo vuelve incómodo si se va a realizar algún tipo de deporte que implique la utilización de las manos. A pesar de que se están realizando distintas investigaciones sobre la medición de la SpO<sub>2</sub> por reflectancia en el pecho, los dispositivos no han logrado pasar la precisión mínima requerida para ser aprobada comercialmente, ni se han obtenidos resultados claros que permitan validar la opción.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar un sistema de monitoreo inalámbrico para el seguimiento de signos vitales en personas realizando actividad física, en tiempo real.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Desarrollar un sistema de monitoreo inalámbrico para la observación de las variables fisiológicas de frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, en personas realizando deporte.
- Utilizar dispositivos de medición existentes en el mercado y adaptarlos para brindar libertad de movimiento y comodidad durante el ejercicio.
- Crear una interfaz de visualización en un computador para observar los signos vitales monitoreados en múltiples personas y permitir el almacenamiento de los datos.
- Realizar pruebas en personas haciendo actividad física para comprobar el funcionamiento del sistema.

## 1.4. Alcances y Limitaciones

Se desarrollará un sistema de monitoreo que permita medir la saturación de oxígeno y frecuencia cardíaca de una persona durante la realización de actividad física. Los sensores a utilizar en el sistema son elegidos entre aquellos dispositivos presentes en el mercado.

La transmisión de los datos sensados será, idealmente, mediante comunicación inalámbrica. La recepción de estos y la interfaz de visualización serán realizadas en un computador, donde el software de procesamiento diseñado será desarrollado con Python.

El sistema creado contará con una alarma que permite avisar al usuario en caso que los valores sensados salgan de los rangos normales aceptados, de manera de brindar asistencia médica en caso que sea requerido.

Una limitación del sistema es que no existen dispositivos de oximetría para deportistas en el mercado, por lo que será necesario adaptar alguno de los sensores disponibles. Al ser utilizados en condiciones de movimiento, la señal puede presentar un ruido asociado entregando datos con interferencia, que pueden variar de las mediciones reales que se estén sensando.

Se realizarán pruebas al sistema de monitoreo, bajo distintos tipos de ejercicio, de modo de verificar el funcionamiento adecuado del software desarrollado.

## 1.5. Temario y Metodología

El temario de este trabajo es el descrito a continuación:

- En el Capítulo 2 se hace una descripción general del sistema a implementar. Describiendo las variables biométricas escogidas para la medición y las etapas que componen el software desarrollado.
- En el Capítulo 3 se describen los sensores biométricos seleccionados desde el mercado y el modo en que son adaptados para ser utilizados en el sistema.
- En el Capítulo 4 se describe el diseño de software de visualización del sistema de monitoreo, explicando detalladamente las partes que componen.
- En el Capítulo 5 se muestran las pruebas aplicadas a personas realizando actividad física y los resultados obtenidos con el sistema.
- Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las principales conclusiones extraídas del proyecto realizado y los temas a abordar en trabajos futuros.

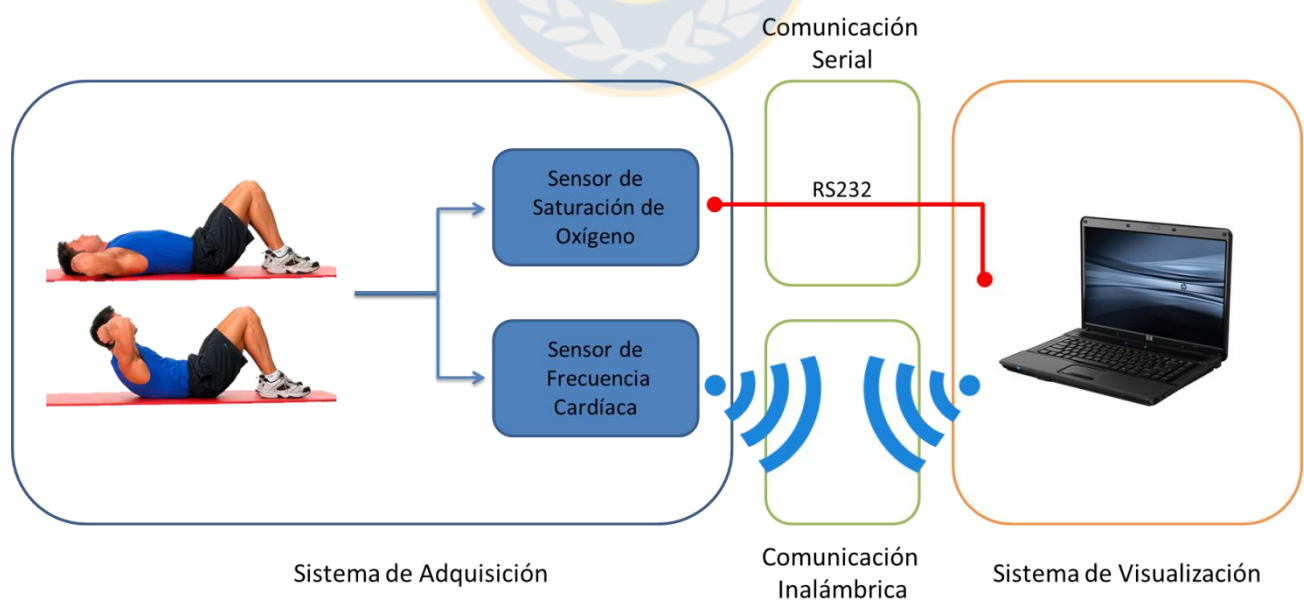
## Capítulo 2. Descripción General del Sistema

### 2.1. Introducción

El sistema implementado busca monitorear algunas señales fisiológicas en múltiples personas simultáneamente durante la realización de actividad física. Esta información es enviada a un computador central, donde es posible visualizar estos datos y establecer un registro de estos. A continuación se describen las etapas que componen el sistema.

### 2.2. Sistema de Monitoreo

El sistema de monitoreo planteado consta de un sistema de adquisición de variables fisiológicas, los cuales corresponden a frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno, a través de sensores especializados para ello. Las variables irán siendo sensadas en tiempo real, pudiendo medir a más de un deportista simultáneamente. También incluye un sistema de visualización que recibe estos datos, para posteriormente mostrarlos en un software ubicado en un computador central. En la figura 2.1 es posible observar un esquema general del sistema implementado.



**Fig. 2.1 Esquema General del Sistema.**

### 2.2.1 Sistema de Adquisición de datos

Primero se hizo una selección de las variables fisiológicas a incluir dentro del sistema de monitoreo para su medición, escogiendo finalmente la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno. Para poder realizar el sensado, es necesario tener un sistema de adquisición que capte estas variables fisiológicas desde el deportista a través de sensores biométricos.

El requisito para la selección de los dispositivos que conforman el sistema de adquisición es que sean equipos que se encuentren disponibles en el mercado y que, de preferencia, sean especializados en la medición durante la ejecución de actividad física. Esto se debe a que durante la realización del ejercicio la adquisición de los datos se ve afectada por el ruido del movimiento, siendo necesario que estos equipos tengan más filtros para entregar una medición precisa de los valores sensados.

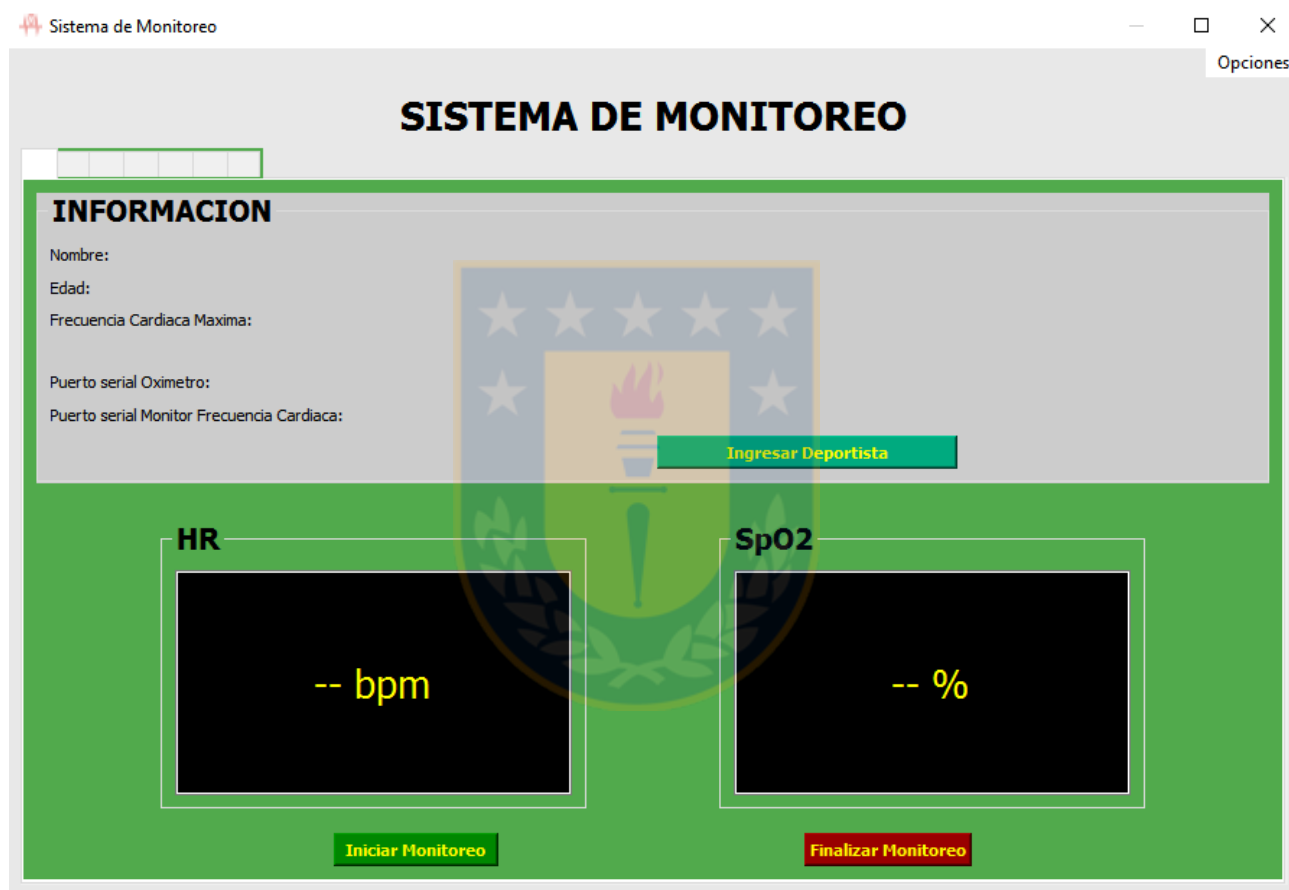
Otra de las características que se busca en estos sensores es que idealmente posean la capacidad de enviar los datos de manera inalámbrica, para facilitar la movilidad del deportista al momento del ejercicio, y favorecer la comunicación y envío de estos, en tiempo real, al medir en el mismo instante en que se está llevando a cabo la sesión deportiva.

### 2.2.2 Sistema de Visualización

Para poder realizar la visualización de los datos sensados, es necesario tener un computador central que se encargue de recibir toda la información enviada al sistema desde los sensores, de modo de poder observar las mediciones que están siendo capturadas durante la realización de la actividad física y establecer un registro de los resultados. En el computador central está instalada la interfaz gráfica diseñada para cumplir con estas funciones (Figura 2.2), programa que es creado en el ambiente de desarrollo integrado de Python(x,y). El software implementado posee las siguientes funciones:

- Permite ir analizando en tiempo real los datos sensados desde el deportista para llevar a cabo el monitoreo de las variables fisiológicas durante la realización de ejercicios, dando la opción de medir simultáneamente a más de una persona.
- Además, permite almacenar estos valores en una base de datos, la que utiliza SQLite como motor de BD, a medida que se va ejecutando el trabajo.
- La interfaz también cuenta con un sistema de alarmas, que permite dar aviso al usuario de cuando un deportista presenta un valor anormal en alguna de las variables biométricas sensadas. Estas alarmas se activan en base a parámetros específicos que pueden ser

modificados por el usuario, de acuerdo a la indicación de un médico. Las alarmas que incluye el sistema corresponden a la disminución de los valores de saturación de oxígeno por bajo el valor límite considerado normal, que por defecto es 95%, y el aumento de la frecuencia cardíaca por sobre el valor de la  $FC_{MAX}$ , la cual es calculada en base a la ecuación 1.1, la que depende de la edad de cada paciente.



**Fig. 2.2** Interfaz gráfica del Sistema desarrollado.

- El sistema de visualización también posee la opción de ingresar a la base de datos del programa, en la que se almacenan todos los valores sensados en tiempo real, a cada deportista durante las distintas sesiones de ejercicio, junto con los antecedentes propios de la persona.
- Permite además ingresar a la configuración de los identificadores de los sensores para poder agregar nuevos dispositivos o quitar algunos que ya no se encuentren en uso.

## Capítulo 3. Selección de Sensores Biométricos

---

### 3.1. Introducción

El sistema de monitoreo consta de sensores biométricos que permiten medir variables fisiológicas durante la realización de ejercicio. Para ello, se busca utilizar dispositivos presentes en el mercado, que sean especiales para deportistas.

En el caso del monitoreo de frecuencia cardíaca es posible encontrar sensores especializados en medición bajo condiciones de actividad física. Pero para el caso de la medición de  $SpO_2$  aún no se han desarrollado dispositivos de seguimiento durante la realización de ejercicio. Es por esto que será necesario adaptar sensores de medición común, de modo que permitan obtener una buena señal bajo condiciones de deporte.

A continuación se mencionará los dispositivos escogidos para la medición de estas dos variables fisiológicas.

### 3.2. Sensor de Saturación de Oxígeno

Para el caso de la elección del sensor de  $SpO_2$ , se presentan más dificultades pues existen muy pocos dispositivos en el mercado que se especialicen en la medición de esta variable durante la realización de actividad física. Luego de una investigación, y analizando las características entre los dispositivos existentes, se decidió escoger un oxímetro de pulso convencional, de los utilizados en centros hospitalarios, para el desarrollo del sistema de monitoreo. Si bien este tipo de oxímetro presenta grandes índices de precisión para mediciones en reposo, no se asegura lo mismo para el caso de mediciones durante ejercicio.

En este caso, el oxímetro escogido es el Nonin Medical Ipod 3211 [24]. Este dispositivo mide la saturación de oxígeno en el dedo del paciente, a modo de pinza (Fig. 3.1). La desventaja de este sensor es que no posee comunicación inalámbrica, por lo que para su conexión con el centro de recepción de datos, va a ser necesario establecer la unión vía cable serial RS232.

El sensor seleccionado es un oxímetro para adultos o personas que tengan un peso superior a 30 kg. La longitud de onda de la luz roja es de 660 nm, mientras que la de la luz infrarroja es de 910 nm. Para realizar la transmisión de datos posee un BaudRate de 9600 baudios. Además, cuenta con un voltaje de alimentación de 2-6 [V]



**Fig. 3.1** Ubicación del sensor de saturación de oxígeno.

La salida de los datos del sensor es vía comunicación serial, donde estos son enviados en un paquete que consta de 3 bytes, una vez por segundo. El protocolo de transmisión de estos tiene una estructura como la que se puede observar en la Fig. 3.2. El formato de envío de datos es de tipo binario.

Byte 1 - Status							
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
1	SNSD	OOT	LPRF	MPRF	ARTF	HR8	HR7
*Note: Bit 7 is always set							

Byte 2 - Heart Rate							
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
0	HR6	HR5	HR4	HR3	HR2	HR1	HR0
*Note: Bit 7 is always clear							

Byte 3 - SpO2							
BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3	BIT2	BIT1	BIT0
0	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0
*Note: Bit 7 is always clear							

**Fig. 3.2** Paquete de datos enviados por Nonin Medical Ipod 3211 [24].

Como se puede ver en la Fig. 3.2, desde el bit 2 al 7 del primer byte corresponden al estado de envío de los datos sensados. El bit 7 siempre toma valor 1, mientras que los siguientes corresponden a indicadores, que si están activos, toman valor 1. Los indicadores representan lo siguiente:

- SNSD: Sensor Disconnect. Este bit indica si el sensor no está conectado al oxímetro o está inoperable.
- OOT: Out of Track. Indica la ausencia de buenos pulsos consecutivos de la señal.
- LPRF: Low Perfusion. Establece un 1 si la calidad de señal es baja/nula.
- MPRF: Marginal Perfusion. Establece un 1 si la calidad de señal es baja/marginal.
- ARTF: Artefact. Indica condición de artefacto en la medición después de cada pulso.

Por otro lado, el bit 1 y 0 del primer byte del paquete y el segundo byte del paquete van a contener información de la frecuencia cardíaca medida por el oxímetro. Mientras que el tercer byte va a tener el valor de la saturación de oxígeno. Es este último el que se desea extraer para obtener el valor de SpO<sub>2</sub> que este sistema de monitoreo desea desplegar.

Tanto los valores de frecuencia cardíaca y SpO<sub>2</sub>, van a corresponder a un promedio de 4 mediciones. Si hay errores en la medición, el sensor enviará como dato de frecuencia cardíaca el valor 511, mientras que el valor de SpO<sub>2</sub> será 127. Estos errores pueden deberse al mal posicionamiento del sensor, el remover el sensor antes de una medición o si la señal no es descifrible.

Este sensor incluye un software que minimiza los artefactos que se puedan generar por movimiento, pero aun así, para analizar el rendimiento de este oxímetro en el sistema de monitoreo creado, se realizarán pruebas posteriores.

### **3.3. Sensor de Frecuencia Cardíaca**

Luego de realizar una búsqueda de distintos dispositivos de medición de frecuencia cardíaca para deportistas presentes en el mercado, analizar sus características, precio y reconocimiento, se optó por escoger el sensor Polar WearLink+ con Bluetooth [25]. El aparato elegido permite medir esta variable en el pecho de la persona, al posicionarlo debajo de los músculos pectorales, gracias a una banda elástica que se ubica a esa altura (Ver Figura 3.3).

El sensor, tal como se ve en la figura 3.4, posee una zona de electrodos de plástico, que se

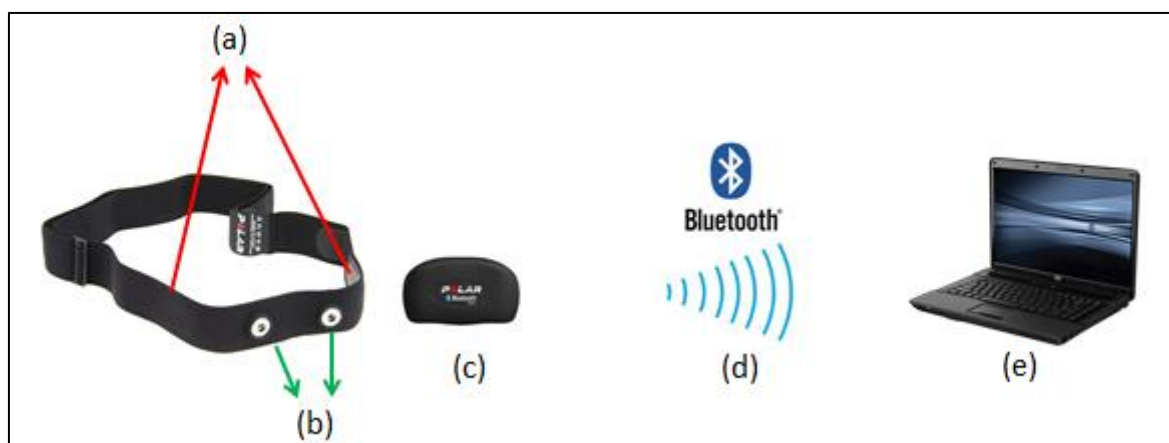


ubican al reverso de la correa elástica (en contacto con la piel de la persona), y que están encargados de captar la señal fisiológica. A su vez, por el otro lado de la correa, tiene unos conectores que permiten adherir un dispositivo transmisor, el que recibe los datos sensados y envía la señal de frecuencia cardíaca de manera inalámbrica, vía comunicación Bluetooth, hasta algún dispositivo receptor.

Una de las características de este sensor, es que puede trabajar cerca de otros dispositivos similares, sin generar ninguna interferencia en la transmisión de los datos. Además, al momento de la transmisión, el sensor se caracteriza por tener un BaudRate de 115200 baudios.



**Fig. 3.3** Ubicación del sensor de frecuencia cardíaca en el cuerpo [<http://xn--80aalewbjz9aa3im.xn--p1ai/nordic-track-treadmill-c2400.php>].



**Fig. 3.4** Esquema general del envío de datos de sensor de frecuencia cardíaca.

- (a) Zona de electrodos, (b) Conectores para insertar el dispositivo transmisor, (c) Dispositivo transmisor de los datos sensados vía BT, (d) Envío de datos vía BT, (e) Estación de recepción y visualización de los datos.

El sensor cuenta con un protocolo de envío de datos que consta de un paquete cuya estructura corresponde a la observada en la Figura 3.5 [26]. El largo del paquete enviado por el sensor es de largo variable, es decir, puede ser de 8, 10, 12 o 14 bytes. La razón de esta variación va a depender de la cantidad de bytes asignados a la información correspondiente a valores del intervalo RR medidos a la persona.

Hdr	Len	Chk	Seq	Status	HeartRate	RRInterval_16-bits
-----	-----	-----	-----	--------	-----------	--------------------

**Fig. 3.5 Paquete de datos enviados por Sensor Polar WearLink+ con Bluetooth [26].**

En el paquete de datos, los distintos bytes van a corresponder a lo siguiente:

- Hdr: llamado Header byte. Corresponde a un byte que encabeza el paquete de transmisión y toma siempre el valor 254 (0xFE), para indicar el inicio de un nuevo dato.
- Len: llamado Length byte, es el byte que indica el largo del paquete de datos. Puede tomar los valores de 8, 10, 12 o 14 bytes.
- Chk: llamado Check byte. Corresponde al byte a un byte de control para asegurar la correcta transmisión de los datos, el valor que va a tomar corresponde a  $255 - \text{Len}$ .
- Seq: Sequence byte. Como su nombre lo dice es un byte de secuencia. Actúa como un contador que va incrementando cada vez que se envíe un nuevo dato. Este byte tiene un rango que varía entre 0 y 15, pues, el contador al tomar este último valor, se reinicia.
- Status: Entrega el estado de la transmisión.
- Heart Rate: es el byte que entrega el valor de la frecuencia cardíaca sensada. Este es el byte que nos interesa extraer para el sistema de monitoreo desarrollado.
- RRInterval\_16-bits: Entrega valores entre las ondas R del ECG captadas por el sensor. Los bytes asignados para estos son los que varían el largo del paquete de datos, pudiendo incluir 8, 10, 12 o 14 bytes, como ya se ha mencionado.

## Capítulo 4. Interfaz de Visualización del Sistema

---

### 4.1. Introducción

Para poder realizar el monitoreo de las variables fisiológicas de los deportistas, dentro de un computador central, es necesario desarrollar una interfaz gráfica que permita generar la visualización de los datos sensados para su evaluación.

El software fue diseñado en el ambiente de desarrollo integrado de Python(x,y), utilizando las siguientes bibliotecas:

- Pyserial: establece comunicación serial con dispositivos conectados al computador. En este caso, se utiliza para establecer la conexión con los sensores biométricos, ya sea a través del puerto COM asignado al BT del sensor de frecuencia cardíaca y a los puertos asignados al oxímetro.
- PyQt4: biblioteca que permite la interacción entre el programa desarrollado y la interfaz que se ha diseñado.
- Datetime: biblioteca utilizada para obtener la fecha actual.
- SQLAlchemy: permite crear una base de datos, de modo de realizar un almacenamiento de los datos sensados durante el funcionamiento del sistema.

Además, se utiliza la herramienta Python Qt Designer para el diseño de la interfaz gráfica.

### 4.2. Interfaz del Usuario

La aplicación de visualización del monitoreo, fue desarrollada utilizando Python, y algunas de sus bibliotecas, para realizar el procesamiento de los datos sensados, además de la herramienta Python Qt Designer para crear una interfaz gráfica amigable que permite una fácil interacción por parte del usuario. En la Figura 4.1 se muestra un diagrama general de la aplicación creada y las etapas al interactuar con ella.

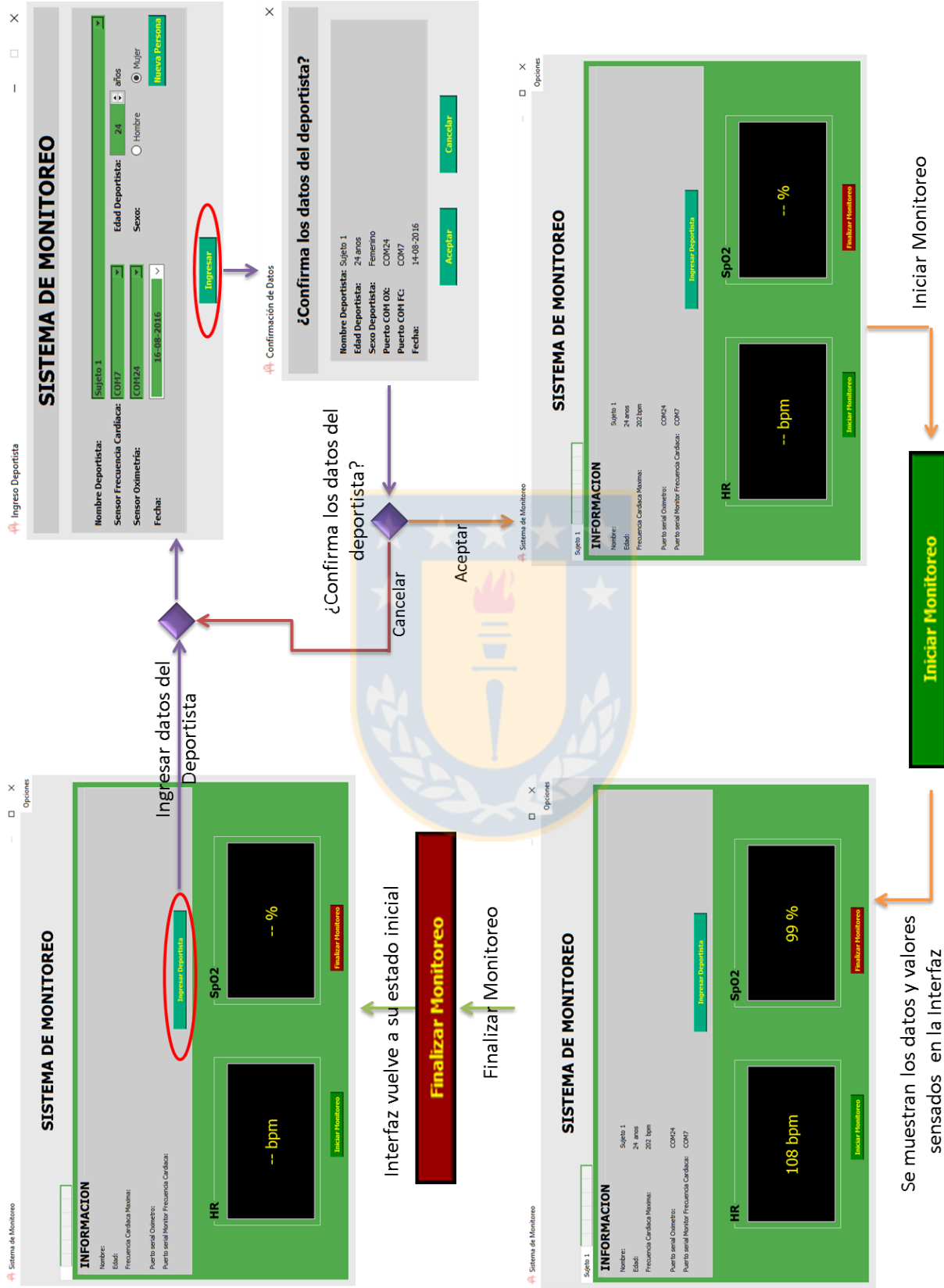


Fig. 4.1 Diagrama general del uso de la Interfaz.

La interfaz de visualización de los datos consiste en una ventana principal, que debe ser manipulada por un encargado de monitoreo. Si algún sujeto desea iniciar el ejercicio, se debe presionar el botón “Ingresar Deportista”, allí se desplegará una nueva ventana en donde la persona a cargo podrá completar los datos de los deportistas que usarán los sensores. Estos son el nombre, la edad, la fecha y el sexo del sujeto, además de una identificación que se asignará a cada uno de los sensores de SpO<sub>2</sub> y frecuencia cardíaca que este portará (Fig.4.2).

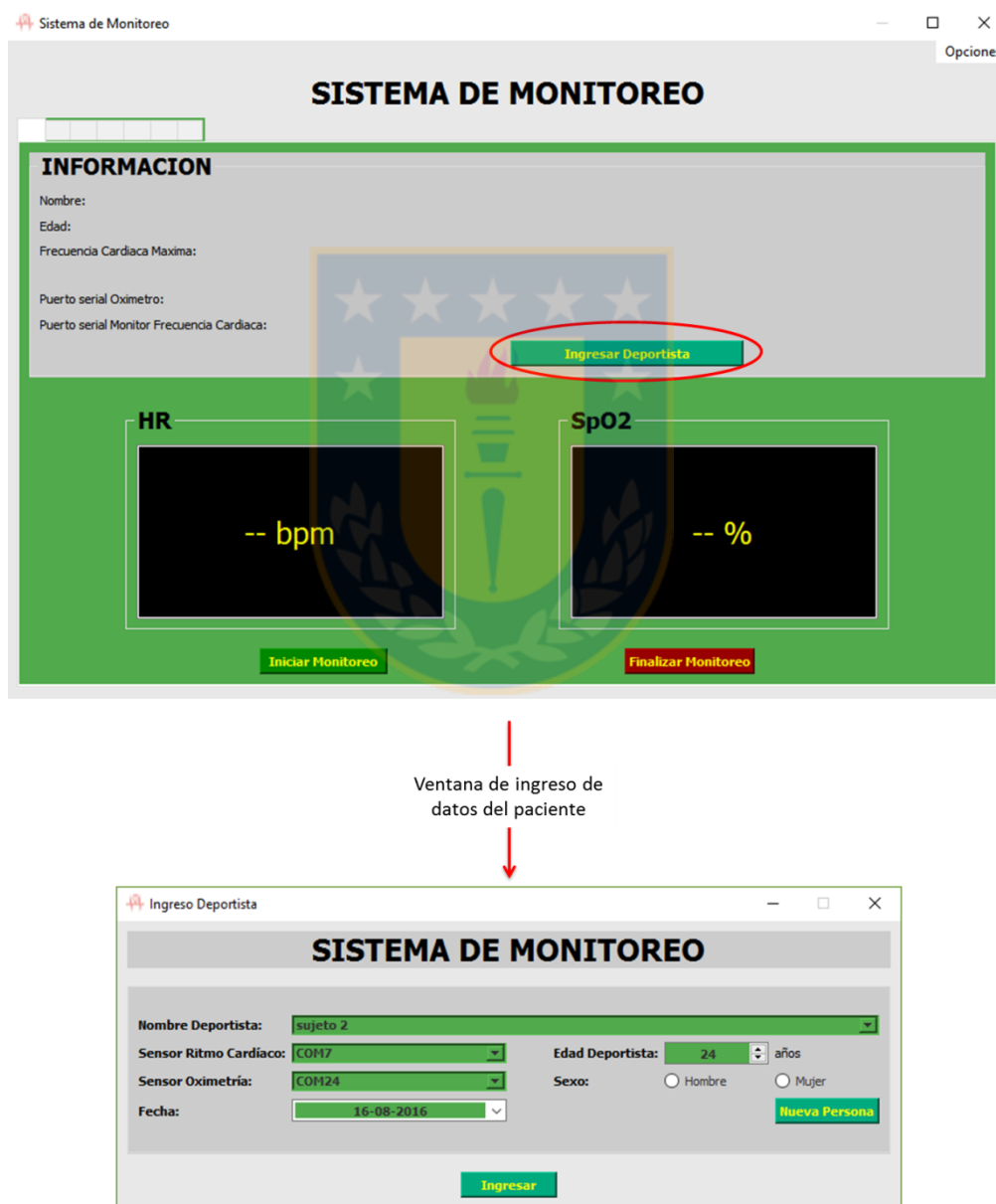


Fig. 4.2 Cuadro de ingreso de los datos del paciente.

Para seleccionar el nombre del deportista, se puede escoger desde una lista desplegable que incluirá todos los nombres de las personas ingresadas a la base de datos. Si el paciente no estuviese previamente en la base de datos, se puede agregar presionando el botón “Nueva Persona”, donde se desplegará una ventana que permitirá llevar a cabo esta acción, tal como se puede ver en la Figura 4.3.



Fig. 4.3 Cuadro de ingreso de nuevo paciente.

Por otro lado, los sensores de frecuencia cardíaca y  $SpO_2$  también pueden ser seleccionados desde listas desplegables que presentarán el nombre de las etiquetas de identificación dada a cada dispositivo, equivalente al puerto COM asignado al parear el dispositivo con el computador. En caso de que los sensores no aparezcan en las listas o se desee hacer alguna modificación de los puertos, se puede acceder a la configuración ingresando al menú de Opciones y seleccionando la alternativa “Configuración de Conexión”. Allí, se despliega una nueva ventana que contiene listas con los puertos COM de los dispositivos que ya fueron identificados como oxímetros o monitores de frecuencia cardíaca, además de una lista con todos los otros dispositivos de los que se pudieron detectar sus puertos COM, pero no han sido reconocidos como alguno de los sensores ya mencionados. En esta ventana se puede agregar los sensores no identificados como oxímetro y

monitor de frecuencia cardíaca a sus listas correspondientes, o bien, se puede mover alguno de los dispositivos ya reconocidos de una lista hacia otra. En la Fig. 4.4 se puede observar un esquema resumen de esta situación. Los cambios realizados en esta ventana, donde se actualiza la identificación asignada a sensores, se guardan para una próxima ocasión en que se utilice el sistema de monitoreo. Esto se debe a que las etiquetas de todos los dispositivos identificados como de frecuencia cardíaca se almacenan en un archivo de texto llamado “COM\_HR.txt”, que al momento de iniciar el programa se carga, renovando la información. Lo mismo pasa en el caso de los sensores de SpO<sub>2</sub>, cuyo archivo que almacena los identificadores, lleva por nombre “COM\_OX.txt”.

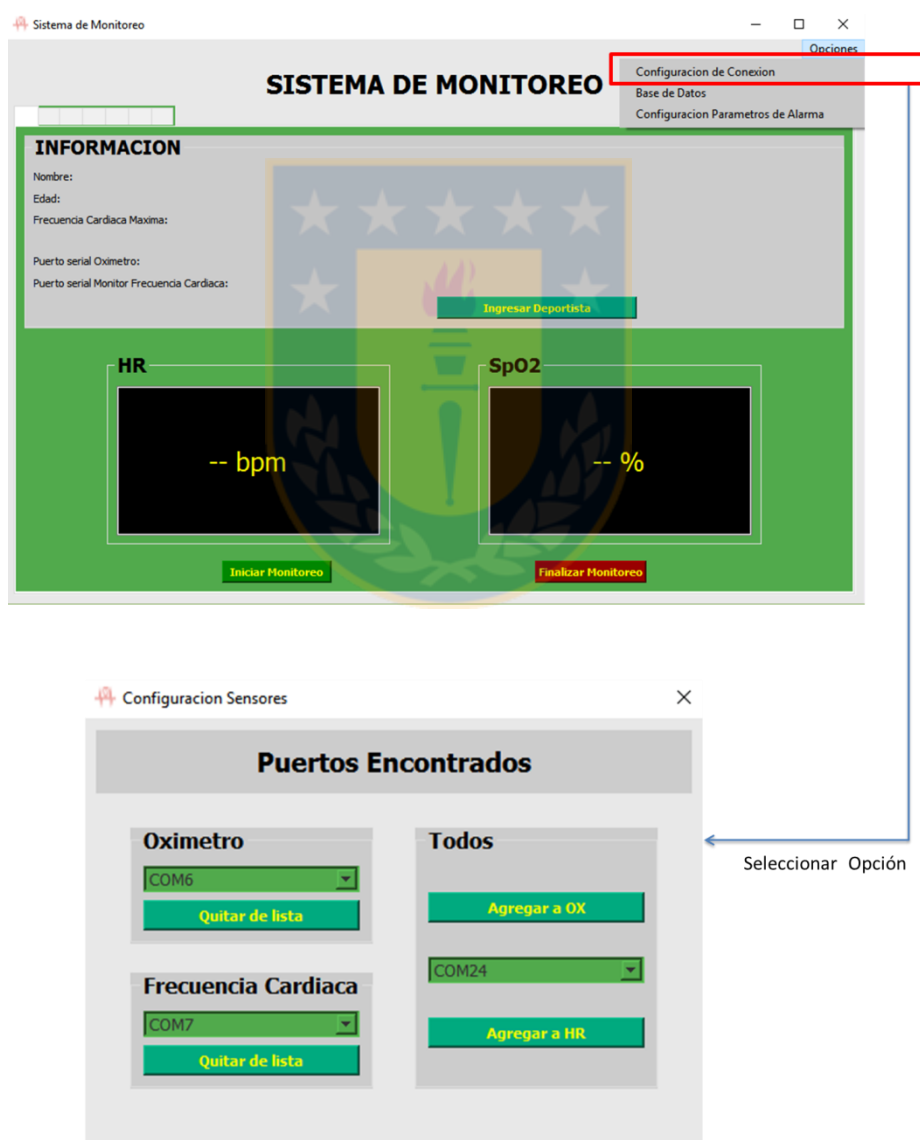


Fig. 4.4 Diagrama de configuración de la conexión de los sensores.

Una vez completados los datos, se presiona el botón “Ingresar”, lo que desplegará una ventana de confirmación para asegurar que la información esté correcta (Fig. 4.5). Si no lo es, se presiona “Cancelar”, dando la opción de modificar los datos. Por otra parte, si la información es la adecuada, y se presiona “Aceptar”, se agrega una pestaña al cuadro de visualización (Fig. 4.6) asignada para el despliegue de la información personal y de monitoreo de la persona, poniendo como etiqueta de la pestaña el nombre correspondiente al deportista. Toda esta información será guardada en la base de datos del sistema, junto con un identificador asociado a esta medición, lo que permitirá ir guardando registro de los datos sensados en la sesión de ejercicios.

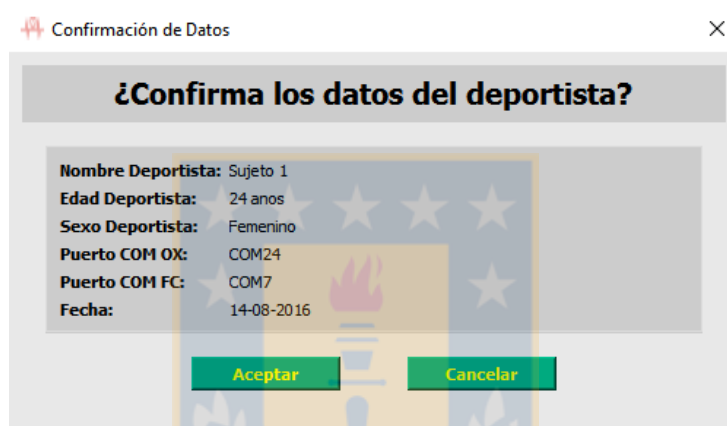


Fig. 4.5 Ventana de confirmación de datos ingresados.

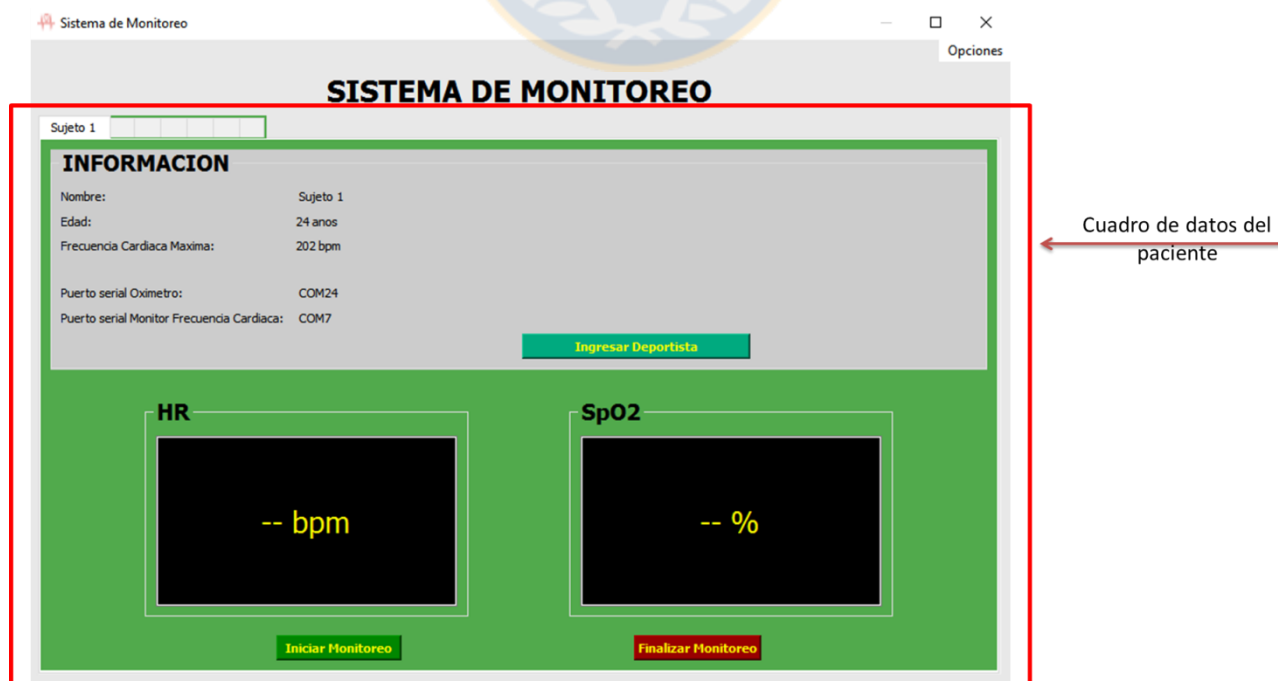


Fig. 4.6 Visualización de datos y parámetros fisiológicos del paciente monitoreado.



El sistema utiliza dispositivos bluetooth. Sin embargo, un computador, o más bien, el adaptador bluetooth de éste acepta un máximo de siete de estos aparatos pareados y conectados a él al mismo tiempo [27], por lo que la aplicación desarrollada está pensada en el monitoreo de siete personas simultáneamente, como límite máximo.

Una vez que sea ingresado el deportista, se da inicio a la obtención de las variables fisiológicas escogidas, correspondientes a la frecuencia cardíaca y saturación de oxígeno. Para ello, el encargado debe hacer click en el botón “Iniciar Monitoreo”. Allí los dispositivos, abrirán los puertos COM que tienen asociados y se dará inicio a la adquisición de estas variables. Para cada sensor, fue necesario realizar un procesamiento individual debido a que el protocolo de envío de datos es propio para cada uno de ellos. Allí se extrae la información requerida desde el paquete recibido y se despliega en cuadros definidos para cada una de las variables fisiológicas sensadas.

En el caso del sensor de oximetría, este envía un paquete de datos de tres bytes con la información de la medición, de las cuales el tercer byte corresponde al valor de saturación de oxígeno. Los datos recepcionados están en formato binario, por lo que se hace una transformación a decimal para realizar el análisis. Con el fin de desplegar el valor de SpO<sub>2</sub> en la interfaz, el programa cuenta con un contador que va incrementando cada vez que un dato es recibido, de modo que cada vez que este tome un múltiplo de tres, va a corresponder al valor de saturación de oxígeno sentido y va a ser mostrado en el cuadro asignado para ello.

Por otro lado, para obtener la frecuencia cardíaca, es necesario seleccionar el byte que trae la información de FC desde el sensor Polar, poniendo especial atención a la cantidad de bytes recibidos, debido a que el paquete de datos no tiene un largo fijo, sino que puede variar entre 8, 10, 12 o 14 bytes. Para ello, se crean vectores que guardan los datos que están siendo sensados para cada dispositivo de monitoreo. El sensor envía los datos como caracteres UNICODE, por lo que se traspasan a formato decimal para facilitar su procesamiento. En el paquete de datos recibido, siempre el primer byte transmitido por el dispositivo va a corresponder al valor 254, mientras que el sexto byte va a corresponder a la FC que está siendo sensada. De esta manera, para extraer el valor de la variable fisiológica buscada, se debe establecer una condición: si el valor que está ubicado cinco veces antes de la posición del último dato ingresado es 254, el valor actual va a corresponder a una medición efectiva de la frecuencia cardíaca. Una vez obtenida, ésta es también desplegada en el cuadro asignado para su visualización.

Además, a medida que los datos de las variables fisiológicas de cada sensor vayan siendo extraídas y desplegadas en la ventana, estos se irán guardando en la base de datos con un

identificador que es asignado previo al ejercicio, al ingresar los antecedentes del deportista, de modo de tener un registro de ellos en caso de que se desee su análisis posterior. En la Fig. 4.7 es posible observar la interfaz de visualización con el sistema de monitoreo en funcionamiento cuando están siendo medidas ambas variables fisiológicas.

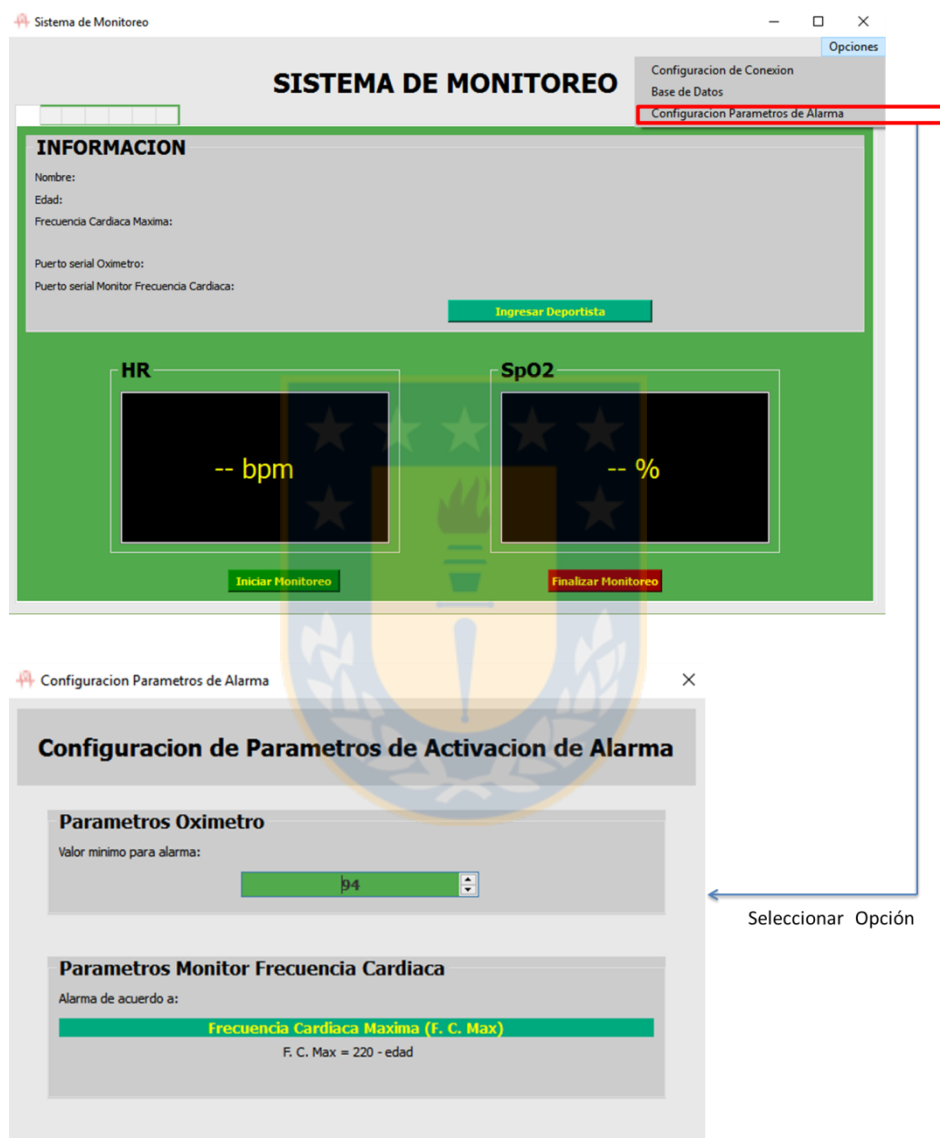


Fig. 4.7 Interfaz de Visualización del Sistema de Monitoreo en funcionamiento.

La aplicación creada también cuenta con un sistema de alarma que desplegará una ventana de alerta en caso de que el valor de frecuencia cardíaca o de  $SpO_2$  de la persona esté fuera de los niveles considerados como normales. Ya es sabido que la frecuencia cardíaca va a estar limitada por la frecuencia cardíaca máxima, que va depender de la edad del paciente, como se muestra en la ecuación 1.1. Por otro lado, los valores normales de  $SpO_2$  fluctúan entre 95 - 100%.

Si se desea realizar un ajuste a los valores requeridos para que se dispare esta alarma, se puede acceder al menú de Opciones y presionar la alternativa “Configuración de Parámetros de Alarma”. Allí, se desplegará una nueva ventana (Fig. 4.8) en la que se muestra la ecuación utilizada

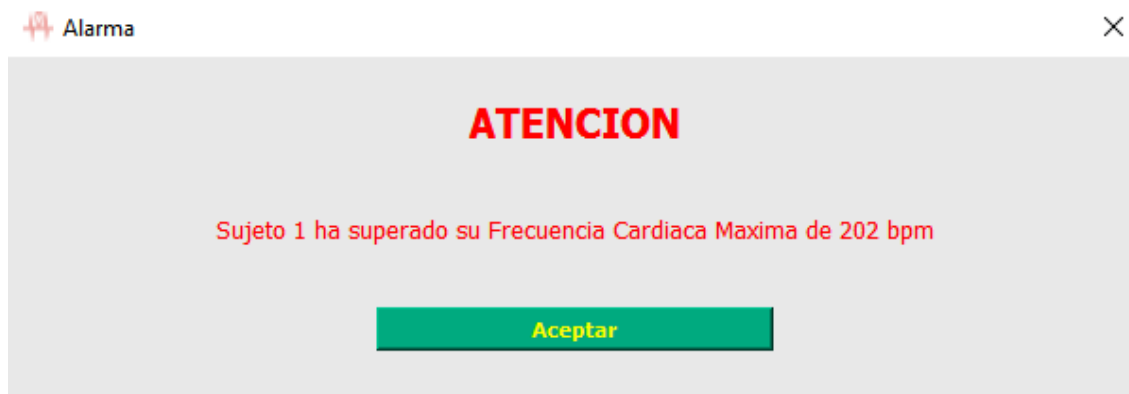
para el cálculo de la frecuencia cardíaca máxima, además de un cuadro que permite variar el valor mínimo de saturación de oxígeno, basándose en lo recomendado por el médico a cargo de la evaluación de la salud de los deportistas.



**Fig. 4.8** Ventana de configuración de valores para activación de alarma.

Para crear el sistema de activación de la alarma, se realiza un proceso que consiste en la comparación entre los valores de los parámetros fisiológicos medidos en tiempo real y los valores establecidos como límite, previo al inicio del monitoreo. En el caso de la frecuencia cardíaca, si el valor medido es superior a la frecuencia cardíaca máxima definida para la persona, se desplegará la

ventana de alarma. Por su parte, en caso del oxímetro, si la SpO<sub>2</sub> medida es menor que valor definido como límite, se va a proceder a la activación de la alerta. La ventana que se despliega con el mensaje de alarma es como el que se puede observar en la Fig. 4.9.



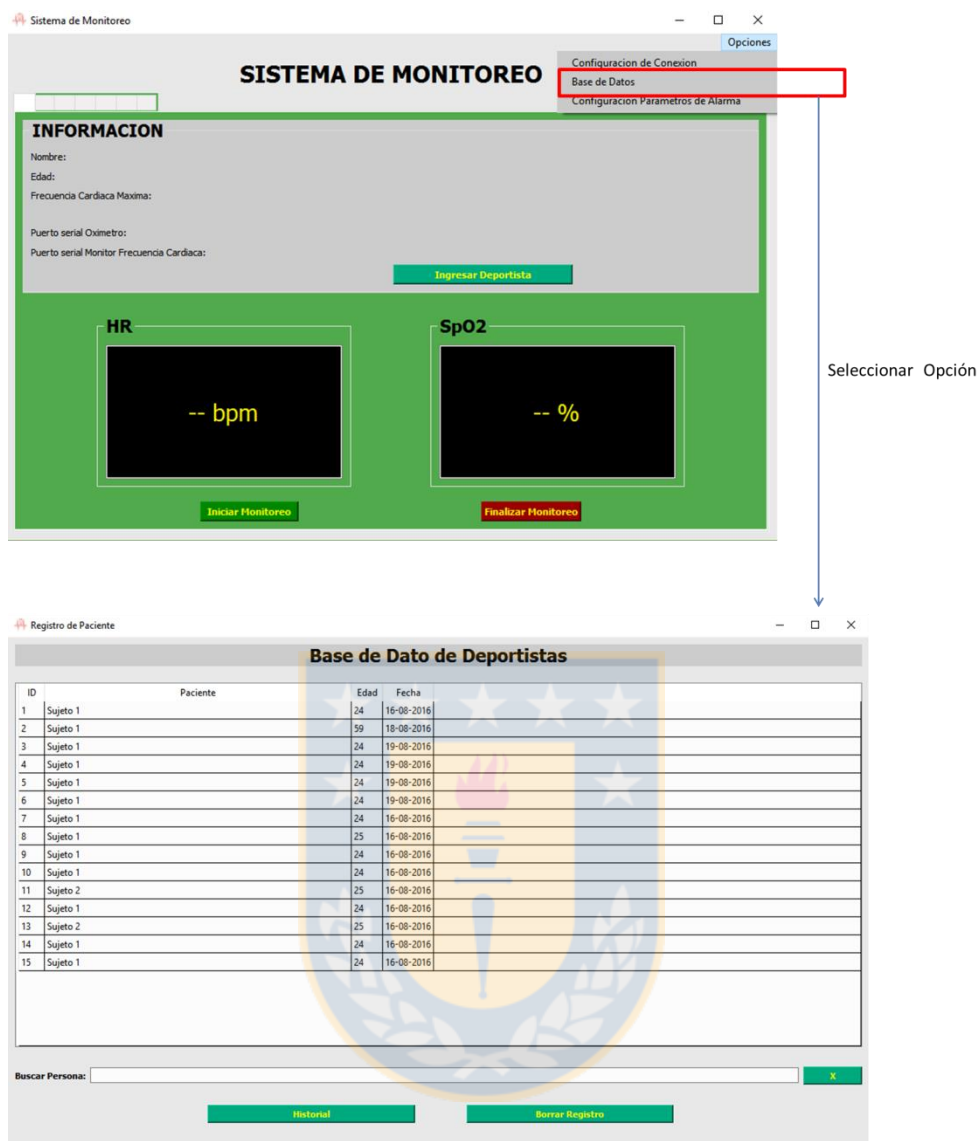
**Fig. 4.9 Ventana de alarma.**

Cuando el deportista finalice el ejercicio, la persona encargada del monitoreo debe presionar el botón “Finalizar Monitoreo” de la ventana asociada a ese sujeto, lo que cerrará los puertos COM asociados a los sensores utilizados por él y se dará por terminada la recepción de los datos captados desde los dispositivos de medición.

### 4.3. Base de Datos

Se creó una base de datos (la cual utiliza SQLite como motor de BD) que permite almacenar la información recogida durante la medición, además de antecedentes propios del paciente que está siendo monitoreado. Para ello, se utiliza la biblioteca sqlalchemy que posee Python. Se podrá acceder a la base de datos gracias a una interfaz gráfica creada con la herramienta Python Qt Designer que permite visualizar todos los registros realizados previamente.

Para comenzar la interacción con la sección de base de datos, se debe ir a la barra de menú de la ventana principal de la aplicación y presionar “Opciones”, allí se extenderá una lista de alternativas, de las cuales se debe seleccionar la llamada “Base de Datos”, lo que dará paso al despliegue de una nueva ventana que contendrá la interfaz gráfica de ésta (ver Fig. 4.10).



**Fig. 4.10** Ventana de base de datos

La base de datos muestra una sección en la que se puede visualizar todos los antecedentes de los distintos deportistas que han sido medidos, además de un identificador asociado a cada sesión de ejercicios iniciada. Toda esta información se despliega en una tabla, cuyas columnas corresponden, de izquierda a derecha, al identificador asociado a la medición, el nombre del deportista, su edad y la fecha en que realizó el ejercicio (Fig. 4.11).

Para poder observar el historial de todas las sesiones de ejercicio de un deportista en particular, la interfaz posee una barra buscadora que filtra la información de acuerdo al nombre del paciente que es ingresado, desplegando un historial de todas las fechas en que se realizó distintas mediciones para aquella persona, junto al identificador asociado a cada una de éstas (Fig.12). La

ventana posee también un botón de reinicio, ubicado al lado de la barra buscadora, que permite eliminar los escrito en ésta rápidamente para volver a desplegar todas las mediciones ingresadas a la base de datos.

Registro de Paciente

**Base de Datos de Deportistas**

ID	Paciente	Edad	Fecha
1	Sujeto 1	24	16-08-2016
2	Sujeto 1	59	18-08-2016
3	Sujeto 1	24	19-08-2016
4	Sujeto 1	24	19-08-2016
5	Sujeto 1	24	19-08-2016
6	Sujeto 1	24	19-08-2016
7	Sujeto 1	24	16-08-2016
8	Sujeto 1	25	16-08-2016
9	Sujeto 1	24	16-08-2016
10	Sujeto 1	24	16-08-2016
11	Sujeto 2	25	16-08-2016
12	Sujeto 1	24	16-08-2016
13	Sujeto 2	25	16-08-2016
14	Sujeto 1	24	16-08-2016
15	Sujeto 1	24	16-08-2016

Buscar Persona:

Tabla de visualización de datos guardados.

**Fig. 4.11** Tabla con mediciones guardadas en la base de datos.

Registro de Paciente

**Base de Datos de Deportistas**

ID	Paciente	Edad	Fecha
11	Sujeto 2	25	16-08-2016
13	Sujeto 2	25	16-08-2016

Buscar Persona:

Buscar Datos de Persona en específico.

**Fig. 4.12** Filtrado de Datos de un Deportista

Si se desea ver el historial de los valores obtenidos en una fecha en especial, el usuario debe seleccionar el identificador asociado a dicha medición, para luego presionar el botón “Historial”.

Allí se desplegará una nueva ventana que mostrará todos los valores sensados de saturación de oxígeno y frecuencia cardíaca medidos en aquel día, incluyendo la hora en que estos fueron medidos, tal como se ve en la Figura 4.13. Esto servirá para realizar un análisis en cuanto al rendimiento físico del deportista, además de mantener el registro de los valores en caso de requerir alguna asistencia médica.

The image shows two screenshots of a software application. The top screenshot displays a table titled 'Base de Datos de Deportistas' with columns for ID, Paciente, Edad, and Fecha. Below the table is a search bar labeled 'Buscar Persona:' and two buttons: 'Historial' (circled in red) and 'Borrar Registro'. An arrow points from the 'Historial' button to the bottom screenshot.

The bottom screenshot shows a detailed view of the 'Historial' for a specific subject. The table has columns for Identificador, Fecha, Saturacion de Oxigeno [%], and Frecuencia Cardiaca [bpm]. The data shows multiple measurements over time, with oxygen saturation values ranging from 95% to 99% and heart rate values ranging from 95 bpm to 101 bpm.

ID	Paciente	Edad	Fecha
1	Sujeto 1	24	16-08-2016
2	Sujeto 1	59	18-08-2016
3	Sujeto 1	24	19-08-2016
4	Sujeto 1	24	19-08-2016
5	Sujeto 1	24	19-08-2016
6	Sujeto 1	24	19-08-2016
7	Sujeto 1	24	16-08-2016
8	Sujeto 1	25	16-08-2016
9	Sujeto 1	24	16-08-2016
10	Sujeto 1	24	16-08-2016
11	Sujeto 2	25	16-08-2016
12	Sujeto 1	24	16-08-2016
13	Sujeto 2	25	16-08-2016
14	Sujeto 1	24	16-08-2016
15	Sujeto 1	24	16-08-2016

Identificador	Fecha	Saturacion de Oxigeno [%]	Frecuencia Cardiaca [bpm]
3	19-08-2016 12:02:50	98	0
3	19-08-2016 12:02:51	98	99
3	19-08-2016 12:02:52	98	99
3	19-08-2016 12:02:54	98	101
3	19-08-2016 12:02:55	99	100
3	19-08-2016 12:02:57	98	100
3	19-08-2016 12:02:58	98	100
3	19-08-2016 12:02:59	97	99
3	19-08-2016 12:03:00	98	99
3	19-08-2016 12:03:01	97	99
3	19-08-2016 12:03:03	97	99
3	19-08-2016 12:03:04	99	100
3	19-08-2016 12:03:06	99	98
3	19-08-2016 12:03:07	99	97
3	19-08-2016 12:03:08	98	97
3	19-08-2016 12:03:09	98	97
3	19-08-2016 12:03:11	98	96
3	19-08-2016 12:03:12	98	95
3	19-08-2016 12:03:13	97	95
3	19-08-2016 12:03:15	97	95

Fig. 4.13 Historial de una sesión de ejercicio específica del Deportista.

Como ya se ha mencionado anteriormente, al momento de ingresar un deportista para una nueva sesión de ejercicios, además de ser incorporado a la ventana de monitoreo, se genera un registro en la base de datos misma, el que contiene el nombre de la persona, su edad, la fecha y el identificador correspondiente. Esto provoca la actualización de la tabla que aparece en la ventana principal de la base de datos, incluyendo ahora a la nueva persona, la que es agregada al final de todos los datos previamente guardados (Fig. 4.14).

The figure illustrates the process of adding a new person to the database through a monitoring system. It consists of three main windows:

- Ingreso Deportista (Top Left):** A form titled 'SISTEMA DE MONITOREO' for entering athlete data. Fields include:
  - Nombre Deportista: Sujeto 1
  - Sensor Frecuencia Cardíaca: COH17
  - Sensor Oximetría: COH24
  - Fecha: 16-08-2016
  - Edad Deportista: 24 años
  - Sexo: Hombre
 A red circle highlights the 'Ingresar' button.
- Sistema de Monitoreo (Top Right):** A window titled 'SISTEMA DE MONITOREO' for 'Sujeto 1'. It displays 'INFORMACION' (Name: Sujeto 1, Age: 24 años, Max Heart Rate: 202 bpm) and monitoring displays for HR (Heart Rate) and SpO2 (Oxygen Saturation). A blue box highlights the 'Ingresar Deportista' button.
- Registro de Paciente (Bottom):** A window titled 'Registro de Paciente' showing a 'Base de Dato de Deportistas' table. The table has columns for ID, Paciente, Edad, and Fecha. The 15th row is highlighted with a red box, showing the newly added record:
 

ID	Paciente	Edad	Fecha
1	Sujeto 1	24	16-08-2016
2	Sujeto 1	59	18-08-2016
3	Sujeto 1	24	19-08-2016
4	Sujeto 1	24	19-08-2016
5	Sujeto 1	24	19-08-2016
6	Sujeto 1	24	19-08-2016
7	Sujeto 1	24	16-08-2016
8	Sujeto 1	25	16-08-2016
9	Sujeto 1	24	16-08-2016
10	Sujeto 1	24	16-08-2016
11	Sujeto 2	25	16-08-2016
12	Sujeto 1	24	16-08-2016
13	Sujeto 2	25	16-08-2016
14	Sujeto 1	24	16-08-2016
15	Sujeto 1	24	16-08-2016

Arrows indicate the flow of data from the 'Ingreso Deportista' window to the 'Registro de Paciente' table and from the 'Sistema de Monitoreo' window to the 'Ingreso Deportista' window.

Fig. 4.14 Ingreso de una nueva persona a la base de datos.



La ventana de la base de datos también tiene la opción de eliminar uno o todos los registros de un paciente, esto se hace seleccionando el identificador de la fila correspondiente a éste y presionando el botón “Borrar Registro”. Si se han eliminado todos los registros de una persona, ésta también será eliminada de la lista de pacientes ubicada en la ventana principal del programa. Un esquema de esto se ve en la Fig. 4.15.

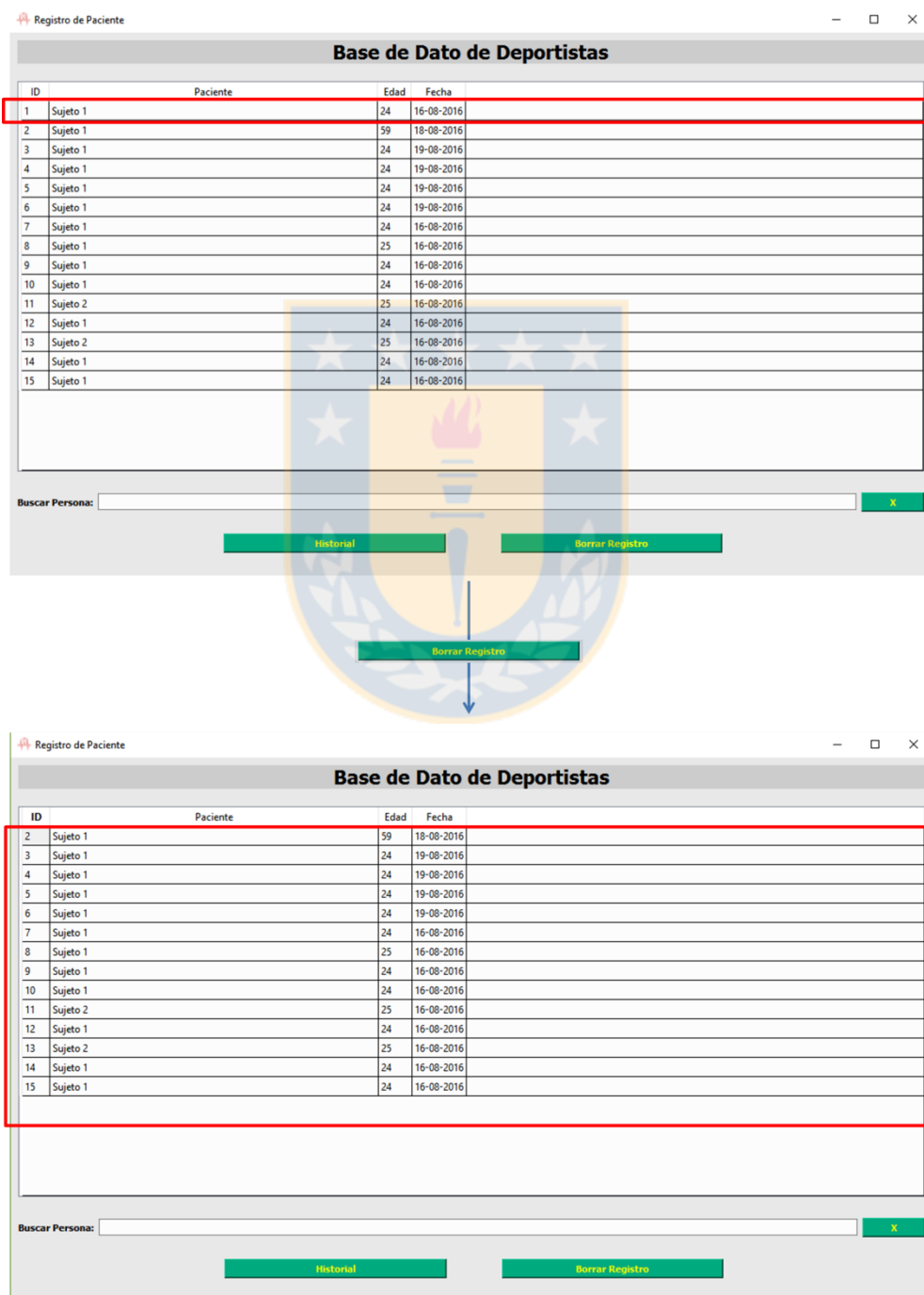


Fig. 4.15 Eliminación de un registro de la base de datos.

## Capítulo 5. Pruebas del Sistema y Resultados

---

### 5.1. Prueba en Personas realizando Actividad Física

Con el objetivo de validar el funcionamiento del sistema desarrollado, se realizaron pruebas en dos sujetos de manera simultánea, debido a la disponibilidad de sensores. Estas pruebas se aplicaron bajo condiciones de reposo y durante la ejecución de distintos tipos de ejercicios físicos. Para el primer caso, las mediciones se realizaron durante cinco minutos, previo al inicio de cualquier tipo de actividad física. Por otro lado, en las mediciones durante el ejercicio, se procedió a medir a los sujetos bajo distintas tareas. Para cada caso, se hicieron mediciones de cinco minutos por actividad.

Estas pruebas se realizaron en un computador Intel Core i7-5500 CPU 2.40 GHz y con una memoria RAM de 8 GB.

#### 5.1.1 Medición en Reposo

Se realizaron mediciones en reposo a dos personas sentadas en una silla, durante cinco minutos. Ambos sujetos de prueba son de sexo femenino, con una edad de 25 y 24 años, respectivamente. A la primera le llamaremos sujeto 1, mientras que a la segunda, sujeto 2.

De la medición anterior, se obtuvo que el sujeto 1 presentó una FC promedio de 87,06 bpm con una desviación estándar de 0,70 bpm. Para la SpO<sub>2</sub> se obtuvo un promedio de 98,01% con una desviación estándar de 0,74%. A su vez, el sujeto 2 obtuvo una FC promedio de 87,15 bpm con una desviación estándar de 0,80 bpm, y una SpO<sub>2</sub> promedio de 97,98% con una desviación estándar de 0,76%.

#### 5.1.2 Mediciones en Actividad Física.

Se realizaron mediciones en distintas secuencias de ejercicio a los dos sujetos de prueba mencionados anteriormente. Estos ejercicios corresponden a: trote a baja y alta intensidad, abdominales, flexiones y sentadillas, donde cada adquisición tuvo una duración de 5 minutos. En la Figura 5.1 se observa a uno de los deportistas siendo monitoreados, mientras que en la Tabla 5.1 se muestra el análisis de los resultados obtenidos en las mediciones de cada secuencia realizada por el sujeto 1, en base a algunas medidas de estadísticas descriptivas. Del mismo modo, en la Tabla 2 se muestra el análisis de resultados obtenidos por el sujeto 2, en sus respectivas secuencias de ejercicios.

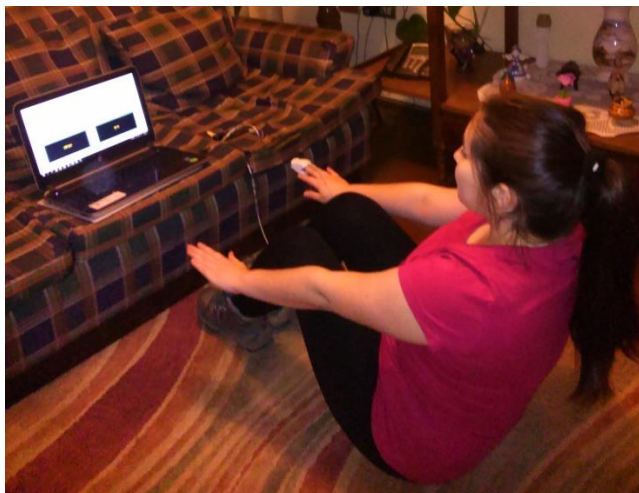


Fig. 5.1 Sujeto de prueba siendo monitoreado por el sistema.

TABLA 5.1 Resultados obtenidos realizando ejercicio, sujeto 1.

Actividad	FC [bpm]		SpO <sub>2</sub> [%]	
	Media	Desviación Estándar	Media	Desviación Estándar
Trotadora baja intensidad	126,21	4,62	98,02	0,80
Trotadora alta intensidad	154,48	11,96	98,00	0,82
Haciendo abdominales	115,68	2,93	98,14	0,80
Haciendo flexiones	111,71	4,60	97,97	0,78
Haciendo sentadillas	130,53	6,53	97,94	0,80

TABLA 5.2 Resultados obtenidos realizando ejercicio, sujeto 2.

Actividad	FC [bpm]		SpO <sub>2</sub> [%]	
	Media Aritmética	Desviación Estándar	Media Aritmética	Desviación Estándar
Trotadora baja intensidad	126,28	4,72	98,00	0,80
Trotadora alta intensidad	154,90	11,18	97,98	0,84
Haciendo abdominales	115,93	2,95	98,32	0,72
Haciendo flexiones	112,05	4,62	98,01	0,77
Haciendo sentadillas	130,14	6,82	97,98	0,80

### 5.1.3 Simulación de Condiciones de Alarma.

Debido a que los sujetos de pruebas son personas saludables, el sistema no arrojó en ningún momento el mensaje de alarma. Para comprobar el correcto funcionamiento del software implementado, se simuló el envío de valores anormales para los sensores de saturación de oxígeno y frecuencia cardíaca. Así, el sistema de monitoreo desplegó las ventanas observadas en las Figuras 5.2 y 5.3 para dar aviso de los valores anormales percibidos.

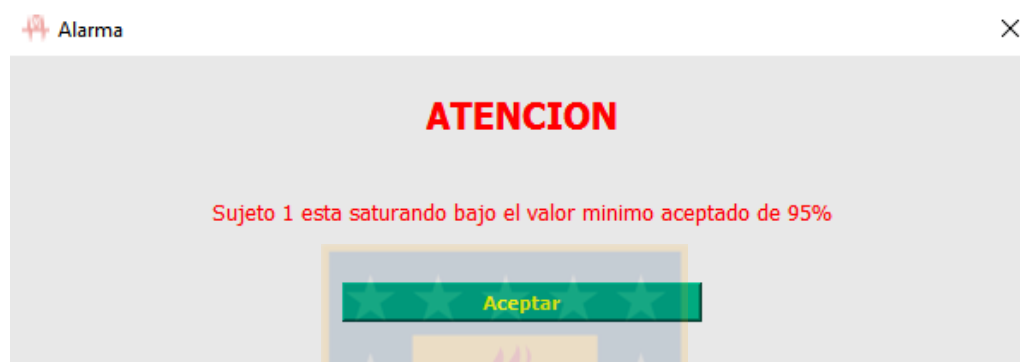


Fig. 5.2 Ventana de alarma desplegada en casos de mediciones anormales de SpO<sub>2</sub>.

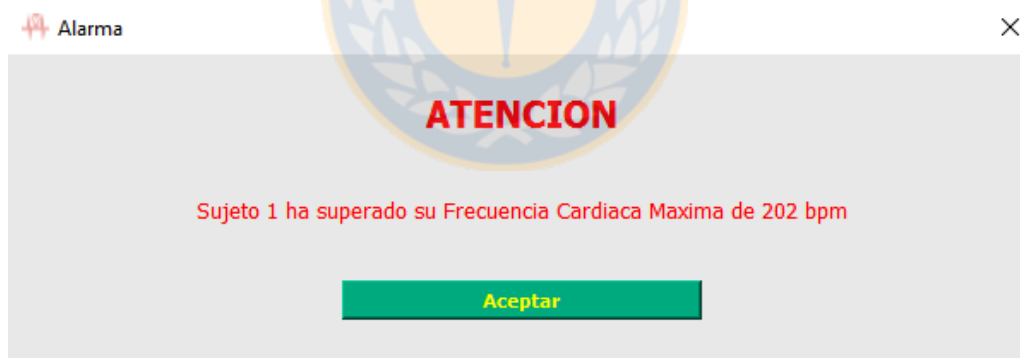


Fig. 5.3 Ventana de alarma desplegada en casos de mediciones sobre FCMAX.

## 5.2. Pruebas de Rendimiento del Sistema

### 5.2.1 Pruebas de distancia

Los sensores de frecuencia cardíaca que usan tecnología inalámbrica en base a Bluetooth poseen un rango de distancia límite en el que es posible establecer la conexión con el computador

central. Para el caso del sensor Sensor Polar WearLink+ con Bluetooth, está establecido que esta distancia es 10 metros.

Se realizó una prueba de testeo para comprobar si esto se cumple o determinar cuál es la distancia máxima en la que el sensor puede establecer comunicación con el sistema desarrollado. La prueba consistió en la medición de las variables fisiológicas de un deportista que se fue alejando del computador central, para poder observar el comportamiento del sensor a medida que la distancia se iba incrementando.

Los resultados obtenidos arrojaron que la distancia máxima a la que el sistema logra conectar con los sensores fue a 4 metros y, dentro de ese rango, la recepción de datos no se vio afectada, recibiendo los valores sensados de manera regular y estable.

### 5.2.2 Rendimiento del computador

Para poder observar el rendimiento de la CPU durante el funcionamiento del sistema se realizó una nueva prueba midiendo a un deportista durante 1 minuto. El registro de esto se llevó a cabo mediante la herramienta “Monitor de rendimiento” que viene incluido en Windows. Los resultados obtenidos arrojaron que, en promedio, el porcentaje de CPU del sistema utilizado fue de 9,538%, con un peak de 26,382%, de los cuales el software desarrollado ocupó, en promedio, el 0,604% de la CPU, con un peak de 24,929%. Estos resultados pueden observarse en la Figura 5.4, donde los datos en rojo corresponden al porcentaje de CPU del sistema total, mientras que los de color azul corresponden al rendimiento de CPU del programa en Python.

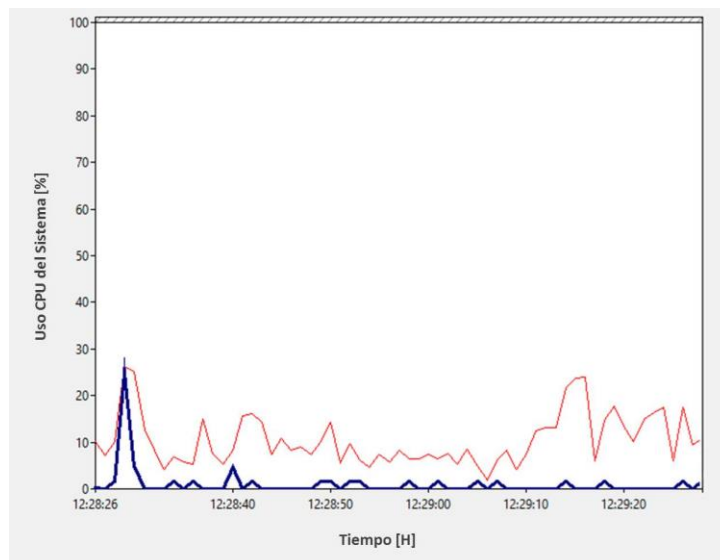


Fig. 5.4 Uso de CPU del sistema desarrollado durante la ejecución del programa.

### 5.2.3 Estimación de cantidad de dispositivos BT que soporta el sistema

Un computador puede aceptar como máximo 7 dispositivos Bluetooth conectados simultáneamente debido al límite de capacidad de su adaptador, por lo tanto al utilizar el sistema de monitoreo desarrollado es posible realizar mediciones a 7 personas haciendo actividad física al mismo tiempo, utilizando los dispositivos seleccionados.

Para poder determinar la estabilidad de conexión con tal cantidad de monitores BT de frecuencia cardíaca, fue necesario realizar una comparación entre el ancho de banda del adaptador Bluetooth de la estación de trabajo y la tasa de transferencia de datos de todos los dispositivos que fueron utilizados. Un adaptador Bluetooth versión 4.0, como el que posee el computador utilizado en estas pruebas, tiene un ancho de banda de 32 Mbit/s. Por otro lado, el sensor Polar WearLink+ con Bluetooth tiene una tasa de transferencia de datos que fluctúa entre 64 bit/s y 112 bit/s debido a la variación en la cantidad de bytes enviados en cada paquete de datos. Si lo que se quiere es medir a las 7 personas de manera simultánea, entonces se tiene una tasa de transferencia de datos con un máximo de 784 bit/s.

De acuerdo a estos resultados, la tasa de transferencia de datos de los sensores es considerablemente menor al ancho de banda del adaptador, mostrando que la transmisión de datos se realizó de manera estable.

Además de esta evaluación, se realizó una prueba en la que se procede a agregar de a poco distintos dispositivos Bluetooth de modo de ir analizando el rendimiento del software, durante la medición de las variables fisiológicas con el sistema desarrollado. En la Tabla 5.3 se puede ver el rendimiento de la CPU al incorporar nuevos sensores BT.

**TABLA 5.3 Rendimiento de CPU al agregar sensores BT.**

Cantidad de Dispositivos BT	Uso de CPU del software	
	Media	Peak
1 Dispositivo	0,994	3,168
2 Dispositivos	0,975	3,119
3 Dispositivos	1,224	6,235

### 5.3. Discusión de Resultados

Al analizar el funcionamiento del sistema durante la realización de las pruebas en estos sujetos, se pudieron ver resultados bastante aceptables.

Primero, al comenzar con el monitoreo e iniciando la interfaz, se observó que el sistema identificó adecuadamente los sensores a utilizar al momento de la medición, y que al ejecutar cambios en la configuración de la conexión, estos se llevaron a cabo obteniendo la respuesta esperada. Luego, al momento de ingresar los datos de los distintos deportistas, el sistema funcionó de manera adecuada, resultando un proceso rápido y sin dificultades.

Una vez iniciado el monitoreo de la frecuencia cardíaca y de SpO<sub>2</sub>, en ocasiones se percibió un leve retraso al momento de mostrar los datos sensados, lo que pudo deberse a la cantidad de información que el computador estaba recibiendo simultáneamente. Sin embargo, esta situación no representó una gran limitante para el sistema desarrollado, pues fue sólo por un breve lapso de tiempo, para luego seguir trabajando de manera correcta, entregando mediciones estables.

El sistema de alarmas implementado funcionó correctamente, tanto al momento de configurar los parámetros considerados como detonadores de alarma, como al momento de desplegar el aviso de alerta para comunicar que alguna de las variables fisiológicas se encontraba alterada.

Finalmente, al momento de detener la comunicación, la interfaz también mostró buenos resultados, cerrando eficazmente los puertos seriales utilizados por los sensores para establecer la transferencia de datos.

El almacenamiento de las mediciones en la base de datos de todos los deportistas monitoreados se realizó tal como se especificaba al momento del desarrollo del programa. El sistema de interacción con la base de datos, ya sea al buscar una persona, agregar un nuevo deportista o eliminar un registro ya ingresado, funcionó adecuadamente.

Ahora bien, luego de realizar una sesión de mediciones especiales y aplicando herramientas estadísticas a los valores obtenidos, se analizó el rendimiento del sistema, obteniendo lo que se describe a continuación:

Primero, observando los valores de las medidas descriptivas obtenidas para el sensor de saturación de oxígeno, fue posible identificar que la desviación estándar no supera 0,84. Este nivel de variaciones está considerado como normal al momento de entregar los datos sensados, según las especificaciones de los creadores del dispositivo.

Por otro lado, en el caso de la realización de ejercicios de alta intensidad, los valores de la desviación estándar del sensor Polar Wearlink arrojaron variaciones más altas, lo que pudo deberse a que el sensor no haya estado posicionado correctamente en el cuerpo o que la correa elástica que lleva los sensores de frecuencia cardíaca haya estado suelta, lo que generaría el movimiento de los sensores, efectuando un ruido que provocó la leve variación de la información monitoreada.

Tras la prueba de distancia, se observó que la medición no se vio alterada por la lejanía del sensor con respecto al computador que actuó como estación de recepción de los datos. El dispositivo tuvo un alcance de 4 metros dentro de los cuales trabajó de manera estable, sin embargo, lo ideal es que esté lo más cerca posible del computador central, por lo que se recomienda el uso del sistema desarrollado en gimnasios y espacios cerrados, para asegurar un correcto funcionamiento del software.

El hecho de que los sensores de oximetría requieran conexión vía USB con el computador es una limitante al momento de realizar ejercicios, pues requiere uniones a través de cableado, lo que entorpece la actividad física. Una opción para esto, es utilizar oxímetros de pulso que tengan comunicación Bluetooth, como el Nonin Connect Elite 3240 Bluetooth Smart [28], cuyo valor está cerca de los US\$250. Esta opción brinda una conexión inalámbrica con el centro de recepción de datos, permitiendo realizar los movimientos de manera más libre y, además, tomar mayor distancia de la estación central. La desventaja en esto es que, como ya se ha mencionado, los computadores tienen un receptor Bluetooth que permite la conexión con siete de estos dispositivos pareados de manera simultánea, lo que disminuiría la cantidad de personas que podrían ser medidas al mismo tiempo con el sistema desarrollado. Una solución a este caso sería la adquisición de un segundo receptor Bluetooth para adicionarle al computador, de esta forma habría mayor cantidad de puertos disponibles para la conexión con dispositivos de este tipo.

Se observó que aumentando la cantidad de dispositivos conectados a la CPU no se presentaron mayores dificultades al momento de ejercer la medición, pues el porcentaje de utilización de CPU del software desarrollado no fue significativo en ninguno de los casos. Por otro lado, al comparar la tasa de transferencia de datos de 7 dispositivos simultáneos con el ancho de banda del adaptador BT de la estación de trabajo, se obtuvo que el tráfico de datos de 784 bit/s estaba muy por debajo del límite establecido de 32 Mbit/s, por lo que la transmisión se realizó de manera estable para esa cantidad de dispositivos bluetooth.



## Capítulo 6. Conclusiones y Trabajo Futuro

---

### 6.1. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es el diseño e implementación de un sistema de monitoreo que permita medir algunas variables fisiológicas, que en este caso son la frecuencia cardíaca y la SpO<sub>2</sub>, realizando la obtención de éstas en varias personas simultáneamente. El cuidado que se debe tener es la selección de los sensores presentes en el mercado, pues se debe escoger aquellos especializados para el monitoreo durante la ejecución de actividad física.

De los sensores seleccionados, sólo el de frecuencia cardíaca correspondiente al Polar WearLink+ con Bluetooth cumple con esta característica. Por otro lado, el sensor de oximetría Nonin Medical Ipod 3211 es un sensor convencional utilizado generalmente bajo condiciones de reposo. Al momento de implementar el sistema de monitoreo, sin embargo, ambos sensores entregan mediciones precisas de las variables en observación, por lo que se acepta su uso.

Al evaluar el rendimiento del software desarrollado, se puede asegurar que cumple con las especificaciones planteadas al comienzo de este trabajo. El sistema efectivamente facilita la medición simultánea de FC y SpO<sub>2</sub> a varias personas, mostrando en tiempo real los valores sensados por cada dispositivo y almacenándolos en la base de datos.

Una limitante del sistema propuesto es que al usar sensores Bluetooth, y considerando que el adaptador BT de un computador sólo acepta un máximo de siete dispositivos sincronizados simultáneamente, el número de personas que pueden ser medidas con estos aparatos es limitado. Una opción sería buscar dispositivos que utilicen otro tipo de comunicación con el computador central, tal como la comunicación Wi-Fi, que además permitiría tener un mayor rango de alcance.

Los sensores utilizados en este trabajo utilizan tanto tecnología BT como comunicación vía cable serial para establecer la conexión con el computador central; esto limita la distancia de los deportistas con su centro de monitoreo al realizar los ejercicios físicos. Se sugiere la utilización de este sistema en espacios cerrados, que no impliquen una gran separación entre las personas y el centro de recepción de datos.

Una de las aplicaciones que se le puede dar a este sistema, es a la medición de las variables fisiológicas a personas que estén realizando deporte en altura. Allí, el tener controlado tanto los valores de saturación de oxígeno y frecuencia cardíaca, toma gran relevancia, debido a las condiciones de alto riesgo que pueden presentarse.

Es de gran relevancia el diseño de distintos sensores fisiológicos especializados en la medición de las variables biométricas, bajo condiciones de actividad física. Surge la necesidad de masificar el desarrollo de dispositivos para lograr sistemas de monitoreo para deportistas más completos y que se busquen métodos más precisos para la medición de aquellas variables bajo las condiciones descritas, donde el movimiento, la temperatura, el sudor, entre otras características, alteran la adquisición de las señales. Este es el caso de la SpO<sub>2</sub>, en el que no existe mayor desarrollo de dispositivos enfocados a la medición en el área deportiva.

## 6.2. Trabajo Futuro

Se propone como trabajo a futuro, mejorar el algoritmo de procesamiento de los datos sensados a modo de optimizar la velocidad de análisis, para así liberar de carga a la CPU y permitir la conexión simultánea de más dispositivos BT.

Otra opción a considerar es buscar un dispositivo de SpO<sub>2</sub> que se ajuste mejor a los requisitos buscados para el sistema, favoreciendo la comunicación inalámbrica. Existen una serie de oxímetros BT en el mercado que podrían cumplir con estas especificaciones.

Una alternativa es el desarrollo de un dispositivo para medir SpO<sub>2</sub>, que permita la obtención de esta señal a través del método por reflectancia, de modo de posicionar el sensor en un segmento del cuerpo distinto a las manos, pudiendo ser en el pecho o la frente del paciente, favoreciendo la movilidad durante el ejercicio.

También se propone que los dispositivos desarrollados tengan otro sistema de comunicación con el computador central. Se sugiere que sea vía Wi-Fi, pues este tipo de conexión brinda un mayor rango de alcance y permite tener más dispositivos conectados simultáneamente.

Finalmente, se propone la opción de incluir otro tipo sensores biométricos wearable al sistema de monitoreo creado, para obtener información más completa sobre el estado de salud del deportista, como por ejemplo: ECG o EMG.

## Bibliografía

- [1] Jack H. Wilmore, David L. Costill, *Fisiología del Esfuerzo y el Deporte*. 6ta ed. Barcelona España: Editorial Paidotribo, 2007.
- [2] F. LaGrange, *Fisiology bodily exercise*. Londres: K. Paul, Trench & Co., 1889.
- [3] Véronique-Aurélié Bricout, Simon DeChenaud, Anne Favre-Juvin. “Analyses of heart rate variability in young soccer players: The effects of sport activity,” in *Autonomic Neuroscience*, vol. 154, pp. 112–116, Abril 2010.
- [4] Meina Li, Youn Tae Kim. “Development of patch-type sensor module for wireless monitoring of heart rate and movement index.” in *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 173, pp. 277–283, Enero 2012.
- [5] American Heart Association. (Septiembre 2014) All About Heart Rate (Pulse). [Online]. [http://www.heart.org/HEARTORG/Conditions/More/MyHeartandStrokeNews/All-About-Heart-Rate-Pulse\\_UCM\\_438850\\_Article.jsp](http://www.heart.org/HEARTORG/Conditions/More/MyHeartandStrokeNews/All-About-Heart-Rate-Pulse_UCM_438850_Article.jsp)
- [6] U.S. Department of Health and Human Services. (Mayo 2015) Pulso. [Online]. <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/003399.htm>
- [7] Robergs, R, and Landwehr, R, "The Surprising History Of The 'HRmax= 220-age' Equation," in *Journal of Exercise Physiology Online*, vol. 5, no. 2, Mayo 2002.
- [8] Arós F, Boraita A, Alegría E, Alonso ÁM, Bardají A, Lamiel R. “Guías de práctica clínica de la Sociedad Española de Cardiología en pruebas de esfuerzo,” in *Rev Esp Cardiol*, vol 53, pp. 1063-1094, 2000.
- [9] S. A. McLellan, T. S. Walsh, “Oxygen delivery and haemoglobin”, in *Continuing Education in Anaesthesia, Critical Care & Pain*, vol. 4, pp. 123-126, 2004.
- [10] Saturación de oxígeno en sangre. Accessed: Mayo 2015. [Online]. [http://www.gasometria.com/saturacion de oxigeno en sangre](http://www.gasometria.com/saturacion%20de%20oxigeno%20en%20sangre)
- [11] Noguerol Casado MJ, Seco González A. Pulsioximetría. Accessed: Mayo 2015. [Online]. <https://www.fisterra.com/material/tecnicas/pulsioximetria/pulsioximetria.pdf>.
- [12] Principio de funcionamiento del oxímetro para monitorización del pulso. Accessed: Mayo 2015. [Online]. <http://polaridad.es/monitorizacion-sensor-pulso-oximetro-frecuencia-cardiaca/>

- [13] Alexandra Fontaine, Arben Koshi, Danielle Morabito, Nicolás Rodríguez. (2013) “Reflectance-Based pulse oximeter for the chest and wrist”, Proyecto de memoria de título, Dep. de Ingeniería Biomédica, Worcester Polytechnic Institute, Estados Unidos.
- [14] Ann Essner, Rita Sjöström, Erik Ahlgren, Birgitta Lindmark. “Validity and reliability of Polar® RS800CX heart rate monitor, measuring heart rate in dogs during standing position and at trot on a treadmill.” in *Physiology & Behavior*, vol. 114-115, pp. 1–5, Abril 2013.
- [15] Ann Essner, Rita Sjöström, Erik Ahlgren, Pia Gustås, Laurie Edge-Hughes, Lena Zetterberg, Karin Hellström. “Comparison of Polar® RS800CX heart rate monitor and electrocardiogram for measuring inter-beat intervals in healthy dogs.” in *Physiology & Behavior*, vol. 138, pp. 247–253, Enero 2015.
- [16] G Patricia López-Herranz. “Oximetría de pulso: A la vanguardia en la monitorización no invasiva de la oxigenación.” in *Revista Médica del Hospital General de México*, vol. 66, pp. 160-169, 2003.
- [17] Lesley Gaskin, Jackie Thomas. “Pulse Oximetry and Exercise.” in *Physiotherapy*, vol. 81, pp. 254-261, Mayo 1995.
- [18] Andrea Ridolfi, Rolf Vetter, Josep Solà, Claudio Sartori. “Physiological Monitoring System for High Altitude Sports.” in *Procedia Engineering*, vol. 2, pp. 2889–2894, 2010.
- [19] Equipo Editorial de Hospimedica, Oxímetro de reflectancia que puede ser usado sobre superficies planas. Accessed: Mayo 2015. [Online]. [http://www.hospimedica.es/cuidados\\_criticos/articles/90420000/oximetro\\_de\\_reflectancia\\_que\\_puede\\_ser\\_usado\\_sobre\\_superficies\\_planas.html](http://www.hospimedica.es/cuidados_criticos/articles/90420000/oximetro_de_reflectancia_que_puede_ser_usado_sobre_superficies_planas.html)
- [20] J. Solà, O. Chételat and J. Krauss “On the reliability of pulse oximetry at the sternum,” in 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Cité Internationale, Lyon, Francia, agosto 23-26, 2007.
- [21] Swiss Center for Electronics and Microtechnology, Pulse oximetry at innovative body locations. Accessed: Mayo 2015. [Online]. <http://www.csem.ch/docs/show.aspx?id=7732>
- [22] O. Chételat, J. Sola i Caros, J. Krauss, S. Dasen, S. Droz, R. Gentsch, J. -M. Koller, J. Luprano, A. O’Hare, P. Pilloud. “Continuous multi-parameter health monitoring system,” in *IFMBE Proceedings*, vol.14, pp. 684-687, 2007.
- [23] R. Vetter, L. Rossini, A. Ridolfi, J. Sola, O. Chételat, M. Correvon y J. Krauss. “Frequency Domain SpO<sub>2</sub> Estimation Based on Multichannel Photoplethysmographic Measurements at the Sternum,” in *IFMBE Proceedings*, vol. 25, pp. 326-329, 2009.

- [24] Ipod Integrated Pulse Oximetry Device Specifications. Accessed: Marzo 2015. [Online]. <http://www.nonin.com/documents/ipod%20Specifications.pdf>
- [25] *Manual del usuario Polar Wearlink Heart Rate Sensor with Bluetooth*, 2013.
- [26] Listening to a Polar Bluetooth HRM in Linux. Accessed: June 2015. [Online]. [http://ww.telent.net/2012/5/3/listening\\_to\\_a\\_polar\\_bluetooth\\_hrm\\_in\\_linux](http://ww.telent.net/2012/5/3/listening_to_a_polar_bluetooth_hrm_in_linux)
- [27] *Specification of the Bluetooth System, v4.2. Master Table of Contents & Compliance Requirements*, Bluetooth SIG Proprietary, Diciembre 2014.
- [28] NoninConnect™ Model 3240/3245 App User Instructions. Accessed: Marzo 2015. [Online]. <http://www.nonin.com/documents/NoninConnectElite3240AppInstructions.pdf>

