

Fit Heart

Alexander Solís Quesada y Gabriel González Rodríguez

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Resumen—En este informe se resume el proceso de diseño e implementación de un dispositivo de monitorización cardíaca. En este caso, el enfoque principal es el monitoreo de la intensidad de ejercicio con el fin de mejorar el plan de entrenamiento de deportistas amateurs. Las variables a medir para lograr este objetivo son BPM (Pulsaciones Por Minuto), VFC (Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca) o HRV, por sus siglas en inglés, y temperatura del deportista. Dichas variables son tomadas en cuenta por medio de una fusión de sensores y se consiguen resultados que apuntan a que la creación de un dispositivo de este tipo con microprocesadores es viable.

Palabras clave—Sensores, Variabilidad de la frecuencia Cardíaca (VFC-HRV), Frecuencia Cardíaca (HR-PPM), Temperatura Corporal, Ejercicio.

I. INTRODUCCIÓN

Este informe tiene como objetivo documentar el proceso de diseño de un dispositivo de monitorización cardíaca para deportistas de entre 20 y 30 años al cual denominamos Fit Heart. Para la realización de dicho dispositivo se necesitó definir una serie de conceptos con anterioridad, entre los cuales destacan las principales variables que busca medir el dispositivo, las cuales son los BPM (Pulsaciones Por Minuto), VFC (Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca) o HRV, por sus siglas en inglés, y las zonas de entrenamiento, que como se verá más adelante depende de las dos variables anteriores más la temperatura.

Los BPM se definen como la cantidad de pulsaciones cardíacas por minuto. Estas varían según la cantidad de actividad física realizadas, sin embargo, también pueden ser alteradas por factores internos del cuerpo como lo podría ser la ansiedad o estrés. Para evitar este último caso los HRV no se empiezan a tomar en cuenta en el cálculo de las zonas hasta que los BPM sean de 120 o más (lo cual indicaría un aumento suficientemente alto como para considerarlo actividad física), por lo que se mantiene en zona 0.

La HRV se refiere a la variación de BPM en un lapso de tiempo determinado. Esta variable es útil porque ayuda a indicar el estado físico de una persona en un momento dado. De forma general, si el HRV es elevado significa que la persona está en buen estado físico, por el contrario, si es bajo significa que la persona está en mal estado físico.

Ya se mencionó el concepto de zonas de entrenamiento pero hasta el momento no se ha definido adecuadamente. Las zonas de entrenamiento se definen a partir de rangos de intensidad física en la cual la zona 0 indica un estado de reposo y la zona 6 el estado más alto de actividad física que una persona puede aguantar, y por periodos cortos de tiempo, sin sufrir alguna efecto negativo en su salud. Las zonas de entrenamiento típicas se definen en la tabla I [1]. En esta tabla se indica la duración en la cual se suele poder estar en cada zona y el %

máximo de BPM que calcula a partir de los BPM máximos para una persona en particular. Este último se puede obtener al llevar a la persona a un punto de actividad física máximo y ver su valor actual de BPM. Otra forma de simple para calcular los BPM máximos de una persona es con la fórmula de Fox y Haskell: $BPM_{MAX} = 220 - edad$, la cual posee un margen de error pero provee una aproximación rápida de calcular [2].

TABLA I
DEFINICIÓN DE ZONAS DE ENTRENAMIENTO TÍPICAS

Zona	Definición	% Max BPM	Duración (min)
Z0	Reposo	< 50	-
Z1	Regenerativo	50 - 60 %	-
Z2	Aeróbico extensivo	60 - 70 %	-
Z3	Aeróbico intensivo	70 - 80 %	-
Z4	Umbral anaeróbico	80 - 90 %	40 - 50
Z5	Capacidad aeróbica	90 - 100	5 - 6
Z6	Capacidad anaeróbica	NA	2 - 4

II. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

II-A. Componentes utilizados

Como primera parte en el proceso de diseño del dispositivo Fit Heart se hizo una selección de componentes y propuestas para el diseño final utilizado. Para esto se tomaron en cuenta las restricciones que se tenían para el proyecto, las cuales se pueden observar en la tabla II junto con el método por el medio del cual se seleccionó la mejor opción de cada componente.

TABLA II
RESTRICCIONES DEL PROYECTO Y METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE COMPONENTES

Restricción	Selección
Dispositivo tipo banda de pecho	En las propuestas de diseño
Poseer pantalla: temp, zona, frec. cardíaca	Trade Study
Poseer alarma: zona 6	Trade Study
Utilizar un sensor de temperatura	Trade Study
Utilizar el sensor de pulsaciones dado	Definido
Cómodo y agradable	Incluido como criterio
Luces LED (opcional)	En las propuestas de diseño

Finalizadas las comparaciones y estudio de las distintas opciones para los componentes del dispositivo se seleccionaron los siguientes componentes, presentes en la tabla de la figura III.

A continuación se muestran los enlaces a los proveedores de dichos componentes. No se agregan a la tabla III por limitación de espacio en el documento.

Sensor pulsos: <https://www.crcibernetica.com/pulse-rate-sensor/>

Sensor Temperatura: <https://www.crcibernetica.com/tmp36-temperature-sensor/>

Alarma: <https://www.crcibernetica.com/active-buzzer-pc-mount/>

TABLA III
LISTA DE MATERIALES

Componente	Detalles	Cantidad	Precio c/u (\$)
Sensor pulsos	Pulse Sensor	1	9.95
Sensor Temp.	TMP	1	1.95
Alarma	Active Buzzer	1	0.95
LEDs	NA	6	0.50
Pantalla	Laptop	1	NA
Micro	ESP-32	1	15.95
Batería	Polymer Li-ion 110mAh	1	11.50
Total			40.8

LEDs: <https://www.microjpm.com/products/ad40124/>

Microcontrolador: <https://www.microjpm.com/products/ad42922/>

Batería: <https://www.microjpm.com/products/lithium-ion-battery-110mah/>

Nota: Durante la ejecución del proyecto se decide no incorporar las luces LEDs por simplicidad del producto, y para mejorar la percepción del usuario ante el dispositivo (que resulte más cómodo a la vista). También que no fundamental su uso ya que este iba a ser para indicar las zonas de entrenamiento, las cuales ya se están mostrando en pantalla.

II-B. Cálculo de las variables biológicas

El dispositivo tiene el objetivo de monitorear tres variables biológicas, las cuales son las pulsaciones del corazón por minuto (BPM), la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC o HRV, por sus siglas en inglés) y la temperatura. Así como la zona de entrenamiento, que se calcula a partir de las variables anteriores. A continuación se presenta como se calcularon cada una de estas variables.

II-B1. Pulsaciones cardíacas por minuto (BPM): La ecuación 1 se utiliza para calcular el valor de BPM actuales. La variable tiempo_RR_actual indica el tiempo en milisegundos entre el pulso actualmente detectado y el pulso anterior.

$$BPM = 60 \left(\frac{1000}{\text{tiempo_RR_actual}} \right) \quad (1)$$

En la ecuación 2 se calcula el valor de BPM promedio. Se toman todos los valores de BPM obtenidos hasta el momento y se dividen entre la cantidad de pulsos menos uno que se han detectado hasta el momento. Este valor de BPM promedio es el que se muestra en pantalla en el dispositivo.

$$BPM_{PROM} = \frac{\sum BPM}{\#Pulsos - 1} \quad (2)$$

II-B2. Variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV): Para el cálculo de la HRV se utiliza la ecuación 3. En esta se realiza el cuadrado de la resta entre la variable tiempo_RR_anterior (que indica el tiempo en milisegundos entre el pulso anteriormente detectado y el anterior a ese) y tiempo_RR_actual (explicada en la ecuación 1).

$$HRV = (\text{tiempo_RR_anterior} - \text{tiempo_RR_actual})^2 \quad (3)$$

En la ecuación 4 se muestra el cálculo del valor de HRV promedio, que es el que se muestra en la pantalla del dispositivo.

$$HRV_{PROM} = \frac{\sum HRV}{\#Pulsos - 3} \quad (4)$$

II-B3. Temperatura: Para el cálculo de temperatura se utilizó un circuito que corresponde a un termistor conectado en paralelo con una resistencia, que tiene la función de ayudar a linealizar la señal del termistor. Se necesita relacionar el valor de resistencia del termistor (Ω) con la temperatura en $^{\circ}C$. La forma en que esto se hace se muestra a continuación.

Se convierte a voltaje el valor obtenido del termistor, denotado como ET, a como se muestra en la ecuación 5.

$$RT = ET \cdot \frac{3,33}{4095} \quad (5)$$

La resistencia en el termistor se calcula con la ecuación 6, que corresponde a un divisor de voltaje, considerando 3,33V como tensión de alimentación y 4,7k Ω como el valor de la resistencia en paralelo.

$$RT = \frac{3,33 \cdot 4700}{VT} - 4700 \quad (6)$$

El valor de temperatura se obtiene a partir de la ecuación 8, la cual es un despeje de la ecuación 7 en donde los valores de A, B y C se obtienen de resolver un sistema de ecuaciones con tres puntos de la forma (**temperatura, resistencia**) de la relación entre resistencia y temperatura del termistor (la cual se obtiene de la hoja de datos).

$$RT = e^{A + \frac{B}{T} + \frac{C}{T^3}} \quad (7)$$

$$T = \frac{1}{D + E \ln(RT) - F(\ln(RT))^3} - 273,15 - 6,7 \quad (8)$$

Con $D = 0,00130752$, $E = 0,000231689$ y $F = 0,000000118475$.

El valor de temperatura obtenido de la ecuación 8 es el que se muestra en la pantalla del dispositivo.

II-B4. Zona de entrenamiento: El cálculo de la zona de entrenamiento, o intensidad de ejercicio, se realiza a partir de un sistema de pesos entre los valores de BPM y HRV promedio, y el valor de temperatura. La forma en que se definen estos pesos se explica en la sección II-C. Se toma la sumatoria de pesos $\sum pesos = peso_{BPM} + peso_{HRV} + peso_{Temp}$. y se define la zona de entrenamiento a partir de ella a como se expresa en la tabla IV.

TABLA IV
DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ENTRENAMIENTO A PARTIR DE LOS PESOS

$\sum pesos$	Zona
< 0,5	0
≥ 0,5	1
≥ 1,0	2
≥ 1,5	3
≥ 2,0	4
≥ 2,5	5
≥ 3,0	6

II-C. Fusión de sensores

Cada una de las variables biológicas medidas aportan información valiosa para determinar en que zona de intensidad de entrenamiento se está ejercitando. Sin embargo, cada una de estas variables también puede representar otra información por lo que su interpretación en conjunto hace que este dispositivo sea más robusto a la hora de determinar la zona de ejercicio.

Según una investigación llevada a cabo antes y durante la realización de este proyecto, cada una de estas variables puede tener más o menos significado en cuanto al ejercicio. La frecuencia cardíaca es la más importante ya que su relación con la actividad física es muy estrecha. Al realizarse ejercicio, los músculos requieren una cantidad significativamente mayor de oxígeno y nutrientes. Estos son transportados por medio de la sangre y para poder abastecer la necesidad, el ritmo cardíaco aumenta [4].

Por otro lado, la variabilidad de la frecuencia cardíaca también resulta útil ya que puede dar indicios sobre el funcionamiento de los sistemas nerviosos simpático y parasimpático. Cuando la variabilidad cardíaca es alta, esto puede indicar que una persona está relajada y que no se encuentra activa pero conforme la variabilidad se vuelve más baja y el corazón más preciso se puede intuir que el sistema simpático toma el control ante una situación de estrés, peligro o de actividad física. Debido a la relación que tiene la variabilidad cardíaca con el estrés, por si sola no es capaz de indicar si se está haciendo actividad física y de que intensidad. De todos modos, brinda información valiosa al combinarse con la frecuencia cardíaca [6] [5].

Por último, se tiene la temperatura. Ante el consumo de energía, en forma de calorías, que se requiere al realizar actividad física, el cuerpo desprende calor. Es por esto que esta variable puede dar información de que tan intensa está siendo una sesión de ejercicio. Sin embargo, la temperatura corporal puede variar debido a una extensa lista de razones entre las cuales se encuentran: la temperatura ambiente, la hora del día, la actividad que se está realizando, el estrés de la persona, la edad, el sexo y el estado de salud de la persona. Es por esto que se considera que esta es la variable menos significativa a la hora de determinar la zona de entrenamiento [7].

Ya que se busca tomar en cuenta la información brindada por todas estas variables biológicas, se propone un modelo de fusión de sensores a nivel de datos que sea combinacional. Para lograr esto se le brinda un peso a cada variable y se normaliza por medio de rangos o ecuaciones el valor de cada peso.

Se decide que la frecuencia cardíaca tenga un peso del 60 %, la variabilidad cardíaca de 30 % y la temperatura de 10 %. Para la determinación de la zona de entrenamiento se definen 7 zonas a partir de el resultado de la suma de los pesos. Dichas zonas van desde el total reposo hasta la intensidad máxima que no debería ser sobrepasada por más de 5 minutos. Es por esto que si se alcanza esta zona, se activa una alarma.

A continuación se muestra como se normaliza cada una de estas variables para la obtención del valor de su correspondiente peso.

II-C1. Frecuencia cardíaca (PPM-BPM): En total relajación o en actividad física muy suave, no debería de sobrepasar el 60 % de las PPM máximas de una persona. Es por esto que a todo valor menor de 120 PPM, se le asigna un valor de 0 puntos. Después de este punto, cada 10 % extra de las pulsaciones máximas se sube un escalón en la intensidad del ejercicio. Para determinar el puntaje de cada valor de PPM, se utiliza una ecuación cuadrática que describe la línea de mejor tendencia de los datos graficados contra su puntaje. El puntaje va de 0 hasta 1.8 que representa el 60 % del puntaje máximo que es 3. A continuación se muestra la gráfica obtenida con la línea de mejor ajuste y el R correspondiente:



Fig. 1. Gráfica de BPM vs puntaje.

II-C2. Variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC-HRV): La variabilidad cardíaca en estado de relajación debe ser superior a 120 ms en personas saludables. Una variabilidad menor a esto puede indicar que se está bajo estrés o que se está realizando actividad física. Para personas bajo un estrés moderado, el valor de RMSSD puede estar entre 60 y 25 ms y cualquier valor bajo 25 ms indica un estrés preocupante o que se está realizando una actividad física muy exigente [8].

Tomando estos rangos en consideración, se definen los puntajes que puede tener cada valor de HRV de manera discreta. La distribución se muestra a continuación, es importante resaltar que en este caso los valores van de 0 a 0,9 que es el 30 % del puntaje máximo.

TABLA V
DEFINICIÓN DE PESO ASIGNADO A LA VARIABILIDAD CARDIACA.

Zona	Valor de la Zona	HRV por RMSSD (ms)	HRV Peso
Relajación	0,0	Más de 120	0
Z1	0,5	120/60	0,15
Z2	1,0	60/25	0,6
Z3	1,5	60/25	0,6
Z4	2,0	60/25	0,6
Z5	2,5	Menos de 25	0,9
Z6	3,0	Menos de 25	0,9

II-C3. Temperatura corporal: Ya que el cuerpo es capaz de regular su temperatura corporal aún bajo esfuerzo físico, que su valor sobrepase los 37°C es indicativo de un esfuerzo fuera de lo común [9]. Es por esto que se le asignan 0 puntos a todas las temperaturas por debajo de 37,5°C y un puntaje de 0,3 a aquellas superiores. El 0,3 representa el 10 por ciento del puntaje máximo.

III. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

De la implementación y prueba del dispositivo se obtuvieron algunas gráficas (se muestra la pantalla del dispositivo, en donde la gráfica de barras corresponde a los BPM Recientes, la gráfica verde a los HRV (RMSSD) Recientes y la azul a los pulsos inmediatos) para distintas zonas de entrenamiento. Primero se tomaron datos con el usuario en reposo, después este procedió a realizar a actividad física con el dispositivo colocado hasta llegar a la zona tres y a partir de ahí se empezaron a tomar los datos conforme este reposaba e iba recuperando su estado inicial.

Para la zona 0 de entrenamiento, cuando el usuario está en reposo, se observan los datos de la figura 2.



Fig. 2. Monitor del dispositivo en Zona 0 (reposo)

Para la zona 3 de entrenamiento, cuando el usuario está experimentando una cantidad moderada de actividad física, se observan los datos de la figura 3.



Fig. 3. Monitor del dispositivo en Zona 3

Para la zona 2 de entrenamiento se observan los datos de la figura 4.

Para la zona 1 de entrenamiento se observan los datos de la figura 5. En este caso se reinició el programa por lo que las gráficas de BPM Recientes y HRV (RMSSD) Recientes están empezando apenas a reportar datos.

Para la zona 0 de entrenamiento, cuando el usuario está en recuperación, se observan los datos de la figura 6.

Se puede observar a través de las gráficas y datos anteriores que el dispositivo está funcionando correctamente, aunque también se notan perturbaciones y datos falsos en ocasiones, principalmente si el dispositivo se mueve o cambia de posición bruscamente.

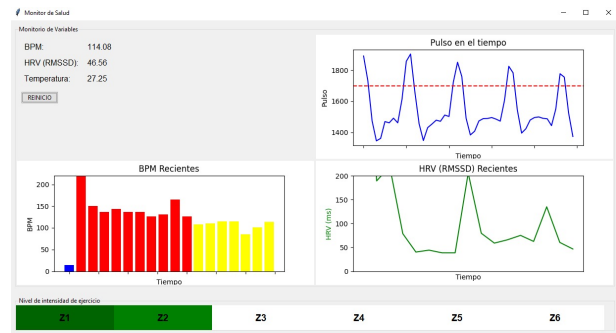


Fig. 4. Monitor del dispositivo en Zona 2

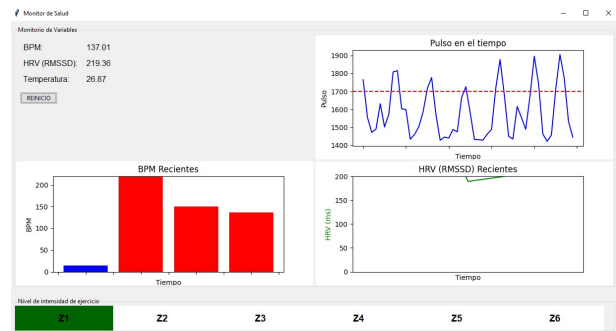


Fig. 5. Monitor del dispositivo en Zona 1

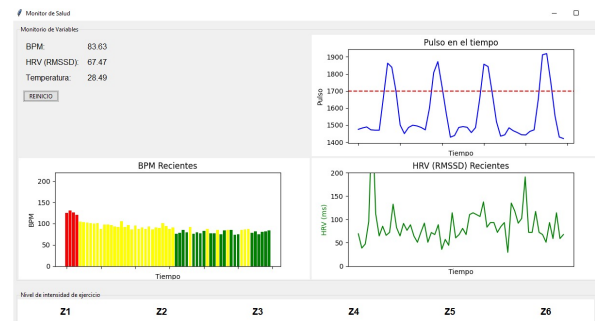


Fig. 6. Monitor del dispositivo en Zona 0 (recuperación)

IV. RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO

- Se recomienda que el dispositivo tenga una memoria interna para que pueda funcionar sin estar conectado a un dispositivo externo. Una vez que el monitor de salud se conecte a la red, este pueda brindar los datos guardados a un usuario para su posterior análisis.
- Se recomienda implementar además de la comunicación UDP por medio de Wi-Fi, comunicación por medio de bluetooth ya que de este modo no se ocupa utilizar datos para la transferencia de información.
- Se propone la creación de una aplicación celular para el monitoreo de datos ya que en algunas prácticas, el uso de una computadora resulta incómodo.

V. BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS

- [1] sagredotraining, "Zonas de entrenamiento: entiende el porqué de cada una y entrena mejor"[Online]. Youtube, November 9, 2020. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=gJZV9ILNQco>
- [2] Triatlón Noticias, "Calcula la frecuencia cardíaca máxima y zonas de entrenamiento", 2021 [Online]. Available: <https://www.triatlonnoticias.com/entrenamientos-triatlon/calcula-frecuencia-cardiaca-maxima-zonas-de-entrenamiento/>
- [3] Bio-Programming, "PROCESAMIENTO ECG 2022 MATLAB — HRV - PRR50 - RMSSD — Parte 2" [Online]. Youtube, August 2, 2021. Available: <https://youtu.be/3x4xbqYfYJ0>
- [4] Villalón, J. M., & Farré, A. L., "El corazón del deportista", 2016. [Online]. Available: https://www.fbbva.es/microsites/salud_cardio/mult/fbbva_libroCorazon_cap68.pdf
- [5] Armando Cuesta, "Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca - Lic. Paola Contreras PhD", 2020. [Online]. Available: <https://youtu.be/Qod2ca3EwE>
- [6] Firstbeat Global, "How to Analyze Stress from Heart Rate and Heart Rate Variability?", [Online]. Youtube, August 30, 2021. Available: <https://youtu.be/uwJjwYuJmHA>
- [7] García Alvero, M. C., Berrade Zubiri, E., & Marín Fernández, B. "Sistemas para determinar la temperatura corporal", 2000.[Online]. Available: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/ibc-34260>
- [8] B. Farnsworth, "Heart Rate Variability – How to Analyze ECG Data", 2019. [Online]. Available: <https://imotions.com/blog/learning/best-practice/heart-rate-variability/>
- [9] Física, A., & Saludables, H. "Consejos para evitar el aumento de temperatura durante la actividad física", s.f. [Online]. Available: <https://emformaprofesionales.esclerosismultiple.com/2018/12/04/consejos-para-evitar-el-aumento-de-temperatura-durante-la-actividad-fisica/>

APÉNDICE

A. Planos del modelo 3D de la carcasa

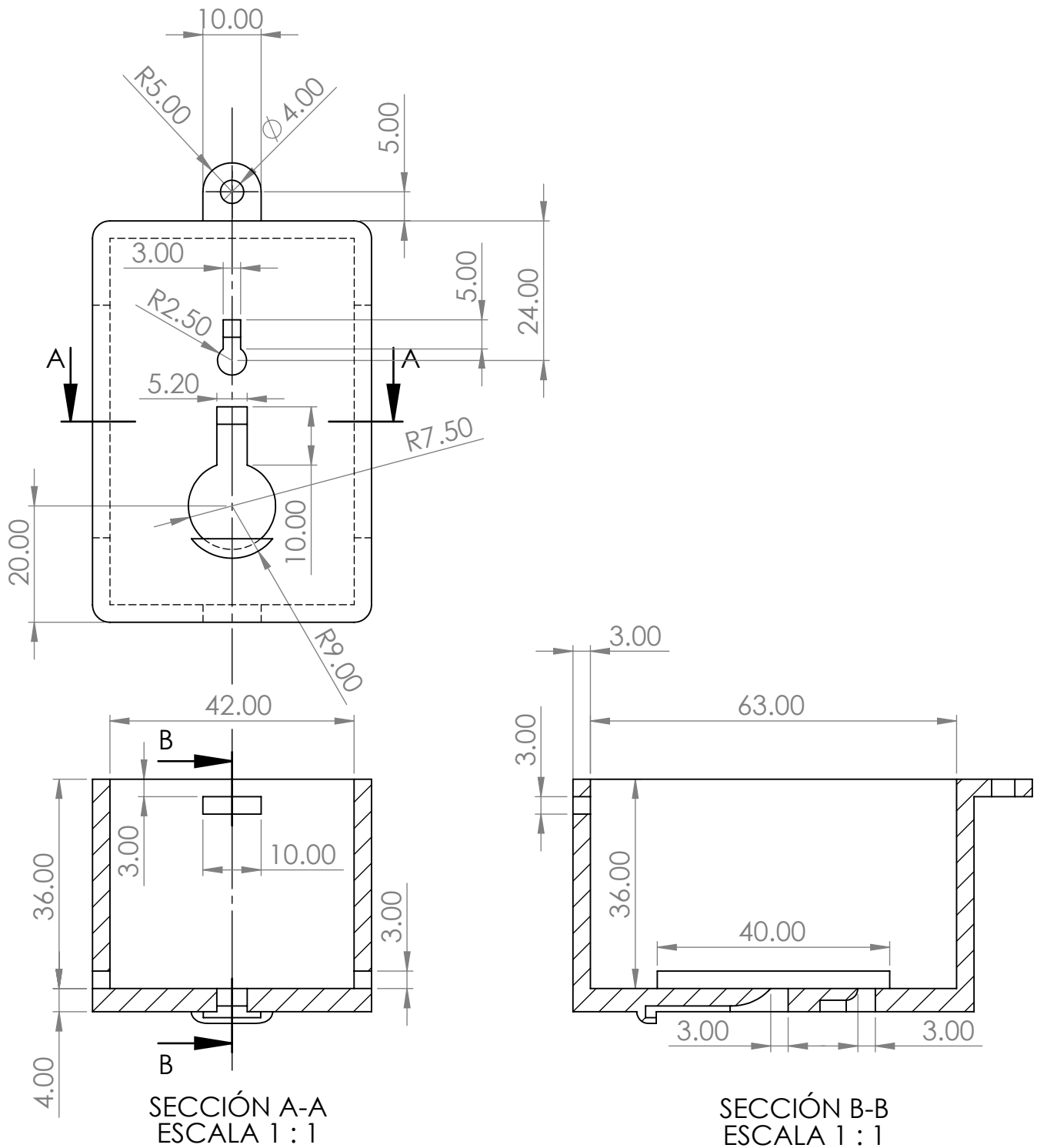
Se presentan los planos del modelo 3D realizado de la carcasa diseñada para el dispositivo Fit Heart.

B. Código utilizado

Se presentan un enlace al repositorio en GitHub donde se encuentra el código utilizado en el proyecto. Este consta de dos archivos: InterfazGrafica.py y IoT.ino.

C. Video promocional

Se presenta el enlace a YouTube del video promocional realizado para el dispositivo Fit Heart.



TEC | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRONICA

REVISIÓN:

CURSO: MT7002 - Sensores y Actuadores

A

NOMBRE
ESTUDIANTES
G. GONZÁLEZ
A. SOLÍS

FIRMA

FECHA
22/11/2023

MATERIAL:

PLA



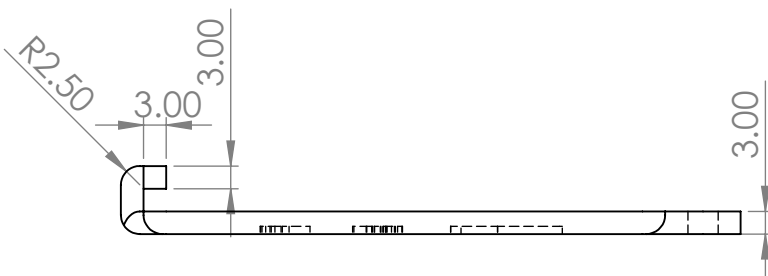
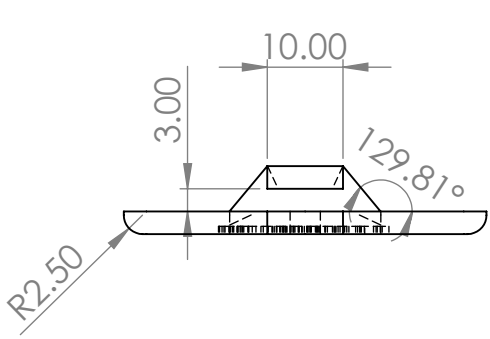
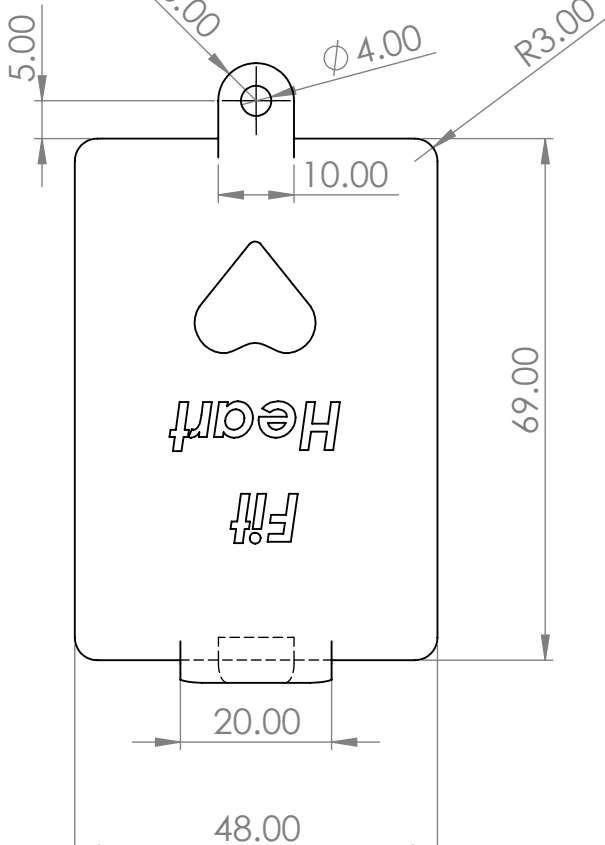
PARTE:

CUERPO DE LA CARCASA DEL DISPOSITIVO FIT HEART

ESCALA: IND

ACOTACIÓN: mm

HOJA 1 DE 2

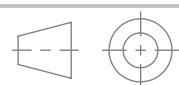


TEC | Tecnológico de Costa Rica

ESCUELA DE INGENIERIA MECATRÓNICA
CURSO: MT7002 - SENSORES Y ACTUADORES

REVISIÓN:
A

NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL:
ESTUDIANTES		22/11/2023	PLA
G. GONZÁLEZ			
A. SOLÍS			



PARTE:		
TAPA DE LA CARCASA DEL DISPOSITIVO FIT HEART		
ESCALA:	IND	ACOTACIÓN: mm
		HOJA 2 DE 2

Enlace al código utilizado para el dispositivo Fit Heart:

<https://github.com/Gabrielgr01/TEC-sensores-y-actuadores/tree/main/Fit-Heart>

Enlace al video promocional del dispositivo Fit Heart:

<https://www.youtube.com/watch?v=qkT6qhINb3g>