



UNIVERSIDAD MODELO

Escuela de Ingeniería

Ingeniería Biomédica

Proyectos VIII

Ing. Ariana Marilyn Sánchez Mutul

**Dispositivo de soporte en la rehabilitación de pacientes
cardiópatas mediante el uso de la Escala de Borg.**

Examen Ordinario

González Gómez Karen

15209522

Junio de 2024

Tabla de contenido

Resumen.....	3
Abstract.....	3
I. Marco teórico.....	4
II. Planteamiento del problema.....	7
III. Hipótesis	8
IV. Objetivo general.....	8
V. Objetivos específicos	8
VI. Materiales y métodos	9
VII. Resultados.....	12
VIII. Discusión	13
IX. Perspectivas a futuro	14
X. Referencias.....	16

Índice de figuras

Figura 1. Dispositivo con pantalla Nextion y bocina que brinda retroalimentación	12
Figura 2. Parte interna del dispositivo con el módulo AD8232, sus respectivos latiguillos de una derivación y el módulo lector de micro SD para la reproducción de audio.....	12

DISPOSITIVO DE SOPORTE EN LA REHABILITACIÓN DE PACIENTES CARDIÓPATAS MEDIANTE EL USO DE LA ESCALA DE BORG

Resumen

El proyecto "Dispositivo de soporte en la rehabilitación de pacientes cardiópatas mediante el uso de la Escala de Borg" busca mejorar la rehabilitación cardíaca en México. Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte en el país, y la rehabilitación es clave para la recuperación. Sin embargo, los programas existentes enfrentan limitaciones, especialmente en centros públicos, debido a restricciones financieras y de recursos.

Este proyecto desarrolla un dispositivo que combina la Escala de Borg, utilizada por los pacientes para evaluar su esfuerzo, con la monitorización de la frecuencia cardíaca en tiempo real. El dispositivo utiliza el módulo ECG AD8232, una pantalla Nextion y un sistema de audio para alertas. La carcasa y el diseño físico se desarrollarán en Autodesk Fusion, mientras que la programación se realizará en el IDE Arduino.

El dispositivo ofrecerá retroalimentación personalizada, mejorando la seguridad y efectividad de la rehabilitación, especialmente en contextos sin supervisión directa. Su implementación inicial se realizará en dos centros de rehabilitación en Mérida, Yucatán, con el objetivo de validar su funcionalidad y su potencial para prevenir complicaciones cardiovasculares. Este proyecto pretende reducir barreras en el acceso a tratamientos eficaces, aportando una herramienta vital para la gestión de la salud cardiovascular.

Abstract

The project "Support Device in the Rehabilitation of Cardiac Patients Using the Borg Scale" aims to enhance cardiac rehabilitation in Mexico. Cardiovascular diseases are the leading cause of death in the country, making rehabilitation essential for recovery. However, existing programs face limitations, especially in public centers, due to financial and resource constraints.

This project develops a device that integrates the Borg Scale, used by patients to assess their exertion, with real-time heart rate monitoring. The device employs the ECG AD8232 module, a Nextion display, and an audio alert system. The casing and physical design will be developed using Autodesk Fusion, while programming will be done in the Arduino IDE.

The device will provide personalized feedback, improving the safety and effectiveness of rehabilitation, particularly in unsupervised settings. Initial implementation will take place in two rehabilitation centers in Mérida, Yucatán, to validate its functionality and potential to prevent cardiovascular complications. This project aims to reduce barriers to effective treatments, offering a crucial tool for managing cardiovascular health.

I. Marco teórico

La rehabilitación cardíaca es definida por la Organización Mundial de la Salud como el conjunto de actividades que se necesitan para asegurar que las personas con patologías cardíacas tengan condiciones físicas y emocionales óptimas que les permita integrarse de manera activa y autónoma a la sociedad y hace 40 años esta misma institución recomendó la inclusión de pacientes con enfermedades cardiovasculares (ECV) en programas de rehabilitación cardíaca (PRC), en la actualidad la Secretaría de Salud reportó que a escala nacional se registraron 223.394 egresos hospitalarios por ECV, entre ellas: cardiopatía reumática (2 %), enfermedades hipertensivas (17 %), enfermedades isquémicas del corazón (23 %), enfermedad cerebrovascular (19 %), enfermedades inflamatorias del corazón (2 %) y otras ECV (37 %), al inicio de la recomendación de personas a ser candidatos para su participación en PRC era mayormente formado por personas de la tercera edad con cardiopatías muy evolucionadas, en insuficiencia cardíaca y siendo portadores de marcapasos o de desfibriladores automáticos implantables en una alta proporción, sin embargo en la actualidad ya es recomendada para pacientes con riesgo a padecer ECV.

La rehabilitación cardíaca precisa del trabajo coordinado de diversas especialidades en el área de salud, como médicos especialistas, personal de enfermería, profesionales en fisioterapia y rehabilitación y, al ser un proceso multidisciplinario de igual forma para atender las necesidades psicosociales de una rehabilitación cardíaca completa se utiliza la ayuda de profesionales en psicología o terapia psicosocial. De igual forma, existen diversas fases en un PRC, la primera fase es la fase hospitalaria, donde el paciente lleva su tratamiento inmediatamente después a un evento cardiovascular hasta su alta, posteriormente se tiene la etapa extrahospitalaria o externa temprana, donde el paciente ya no se encuentra hospitalizado pero lleva las terapias de entrenamiento físico supervisadas, terapias psicosociales y educación para la salud de forma frecuente dentro del hospital durante un periodo de 3 y 12 meses y, por último se tiene la fase de mantenimiento o externa tardía donde los servicios de rehabilitación y preventivos se realizan en su domicilio y se busca que se apliquen los aprendizajes que se obtuvieron en fases anteriores.

Dentro del *Tercer Registro Nacional de Programas de Rehabilitación Cardíaca en México* (Lara-Vargas, 2022), hubo un registro total de 45 centros de rehabilitación cardíaca en los 32 estados del país de los cuales 75.5% es decir, 34 eran de índole privado mientras que sólo el 24.5 % es decir, 11 eran de práctica pública y, de acuerdo a una encuesta realizada al personal de salud involucrada en los centros se evidenció que en el 93% de los candidatos percibieron algún tipo de barreras en los pacientes ingresados: financieras (83 %), falta de personal de salud (64 %), falta de centros de rehabilitación cardíaca (C-RHC (43 %)), falta de equipamiento (71 %), falta de referencia de pacientes a los C-RHC (93 %), desconocimiento de los PRC por parte de los médicos tratantes (86 %), limitaciones en cuanto al área física (50 %) y otros (14 %).

Durante el desarrollo de las terapias físicas supervisadas de los PRC los profesionales manejan diversas técnicas para la evaluación del nivel de gasto cardíaco que el paciente presenta durante la duración de

la prueba de esfuerzo, un ejemplo es el uso de parámetros subjetivos para reemplazar métodos más costosos como se demuestra en el artículo que lleva por título *Asociación entre la Escala de Borg de esfuerzo percibido y parámetros fisiológicos en la intensidad del ejercicio* (Johannes, 2013) donde mediante el estudio de 2560 participantes se evaluó la precisión de la Escala de Borg, la cual funciona como método de monitorización del esfuerzo que realiza el paciente percibido por sí mismo. Esta se evaluó en relación con los verdaderos signos vitales reportado en los pacientes y se concluyó que la relación entre el modelo de la Escala de Borg y la intensidad del ejercicio basado en monitorización cardíaca es precisa y puede ser utilizado como una herramienta válida y accesible para monitorizar la intensidad del ejercicio para la prevención de enfermedades cardiovasculares primarias y secundarias. La cirugía cardíaca conlleva disminuciones en la capacidad de ejercicio en las etapas iniciales de los programas de rehabilitación, en comparación con pacientes sometidos a intervenciones menos invasivas o no cardíacas. Estos cambios están asociados con la gravedad de la enfermedad, la alta prevalencia de comorbilidades, la duración del desacondicionamiento muscular, el dolor incisional, el drenaje torácico y la circulación extracorpórea. Por lo tanto, es común observar un declive en el rendimiento funcional durante la estancia en la UCI. Varios estudios han reportado una disminución en la capacidad funcional al comparar los períodos pre y postoperatorios de la cirugía cardíaca. A pesar de esto, se ha observado una restauración espontánea de la capacidad funcional, incluso en pacientes que no participaron en ningún protocolo de investigación. En condiciones específicas, como en personas de edad avanzada, un menor volumen de entrenamiento y períodos de recuperación más largos pueden ser suficientes.

Debido a las particularidades individuales, una terapia estructurada que incluya el tipo, la intensidad, la frecuencia y la duración basada en evaluaciones individualizadas es fundamental para una prescripción adecuada y, en consecuencia, para los resultados funcionales a largo plazo después del alta hospitalaria. Según Stiller et al. y Bourding et al., la movilización temprana después de la cirugía cardíaca promueve varios beneficios, incluida una mejor ventilación, relación ventilación/perfusión, fuerza muscular respiratoria y capacidad funcional. Las revisiones sistemáticas de Kanejima et al. y Guerra et al. también demostraron efectos positivos sobre la capacidad funcional, considerándose seguras y factibles en pacientes críticamente enfermos. Por otro lado, Santos et al. sugiere que la movilización temprana, evaluada a corto plazo, no promueve cambios significativos en la capacidad funcional.

Diferentes resultados pueden justificarse por divergencias sobre los conceptos de movilización temprana. Es importante destacar que la variedad de estudios con diferentes puntos de inicio dificulta la prescripción, ya que es esencial definir el momento de inicio para evitar riesgos para el paciente debido a una movilización muy temprana o tardía.

Además, el término movilización también abarca varias terapias. La mayoría de los tipos de modalidades encontradas fueron protocolos de movilización progresiva, incluyendo ejercicios activos, sentarse fuera de la cama y caminar, solo protocolos de caminata y sentarse temprano fuera de la cama. No todas estas terapias requieren instrumentos para su realización. Otros estudios incluyeron instrumentos, como el ergómetro de ciclo, la realidad virtual y ejercicios de resistencia con almohadillas

para la espinilla y mancuernas. Con respecto a la intensidad, la mayoría de los estudios no utilizaron criterios objetivos. Hirschhorn et al. aplicaron la escala de Borg modificada con un objetivo de tres a cuatro puntos, equivalente a una intensidad de ejercicio moderada a baja, mientras que Zanini et al. realizaron ejercicios con el objetivo de alcanzar el nivel 11 en la escala de Borg de seis a 20 puntos. Esta intensidad corresponde a ejercicios ligeros, en los que los participantes sienten que el esfuerzo es "muy ligero".

En otros estudios, se utilizó un cambio en la frecuencia cardíaca de 20 a 30 latidos por minuto por encima de la frecuencia cardíaca basal para determinar la intensidad del ejercicio. Otra forma de determinar la intensidad del ejercicio es la frecuencia cardíaca de reserva (frecuencia cardíaca máxima - frecuencia cardíaca en reposo). Sin embargo, este método se basa en la frecuencia cardíaca máxima alcanzada en una prueba de esfuerzo que puede cuantificar los umbrales anaeróbicos y, por lo tanto, determinar la prescripción de ejercicio adecuada. Este tipo de prueba no se realiza en el período postoperatorio temprano.

En el contexto de desarrollo de dispositivos y herramientas dentro de la rehabilitación cardíaca y el diagnóstico, surge HearOTM, una herramienta digital innovadora que utiliza el habla como biomarcador para monitorear la insuficiencia cardiaca y alertar sobre posibles complicaciones, permitiendo una intervención temprana.

Desarrollada en colaboración entre el Hospital Universitario de Bellvitge, el IDIBELL, AstraZeneca y la empresa Cordio Medical de Israel, HearOTM ha iniciado su primera prueba de vida real en marzo, con la participación de más de 50 pacientes. La aplicación convierte los teléfonos móviles en dispositivos médicos avanzados al monitorear diferentes muestras de habla de los pacientes. Mediante inteligencia artificial, aprende el modelo de habla del paciente y detecta cambios relacionados con la insuficiencia cardiaca, alertando al médico para una acción rápida y eficaz. La validación previa en Israel y Estados Unidos ha demostrado la efectividad de HearOTM, siendo capaz de predecir hasta un 79,6% de las recaídas en pacientes con insuficiencia cardiaca congestiva estable, hasta 18 días antes de que ocurran. Esta herramienta promete transformar la atención médica al permitir un monitoreo continuo y una intervención temprana, reduciendo así el riesgo de complicaciones y mejorando los resultados clínicos. AstraZeneca, está comprometida con la innovación en el abordaje de patologías de alto impacto en salud como la insuficiencia cardíaca. César Velasco, director de Innovación y Estrategia Digital de AstraZeneca España, destaca el objetivo de impulsar el desarrollo de soluciones innovadoras que mejoren integralmente el tratamiento y seguimiento de los pacientes con esta enfermedad. Sin embargo, el uso de Inteligencia Artificial ha sido una de las principales controversias en la aceptación de esta app dentro de la comunidad médica.

II. Planteamiento del problema

El problema de salud más acuciante en México se relaciona estrechamente con las enfermedades cardiovasculares, que han mantenido su posición como la causa principal de muerte incluso después de la pandemia de COVID-19 en 2021, la cual dejó un total de 132,742 fallecimientos registrados a principios de ese año. Esta situación subraya la creciente cantidad de personas en riesgo de eventos cardiovasculares y la importancia de abordar este problema de manera efectiva. Actualmente, existen dos enfoques principales para el tratamiento de estas enfermedades: la prevención cardiovascular y la rehabilitación cardíaca.

La rehabilitación cardíaca es fundamental para mejorar la calidad de vida y el pronóstico de los pacientes cardiópatas. Sin embargo, los programas de rehabilitación existentes en México, que son supervisados por un equipo multidisciplinario de profesionales de la salud, enfrentan limitaciones financieras significativas. Esto se refleja en que, aunque ha habido un crecimiento en el número de centros de rehabilitación privados, la situación no ha mejorado en los centros públicos. Una propuesta para abordar esta brecha y aumentar la inclusión de pacientes en programas de rehabilitación es explorar la posibilidad de desarrollar programas no supervisados, aprovechando la telemedicina como recurso principal. En este contexto, el desarrollo de tecnologías de retroalimentación portátiles se ha convertido en un área de interés creciente ya que tienen el potencial de proporcionar una monitorización continua y no invasiva de los pacientes durante las sesiones de rehabilitación cardíaca.

La identificación de los niveles de la escala de borg durante sesiones rehabilitativas pueden ofrecer información valiosa sobre su estado fisiológico, incluyendo signos de fatiga cardiovascular y estrés. Sin embargo, las investigaciones actuales no abordan adecuadamente la personalización de las sesiones de rehabilitación. Cada paciente tiene capacidades cardíacas únicas, determinadas por sus características demográficas y la gravedad de su condición cardíaca. Los algoritmos utilizados en las aplicaciones y dispositivos existentes a menudo se basan en tendencias generalizadas y no tienen en cuenta estas diferencias individuales, lo que podría plantear riesgos en un entorno clínico crítico.

La justificación para este proyecto de tesis radica en la necesidad de proporcionar una solución para mejorar la calidad y seguridad del entrenamiento físico en pacientes en programas de rehabilitación cardíaca mediante el diseño de un dispositivo de monitorización que utilice un software para analizar la relación entre la escala de borg y la frecuencia cardíaca de los pacientes. Este dispositivo se implementará en dos centros de rehabilitación en Mérida, Yucatán. La propuesta de utilizar la telemedicina centrada en el análisis de la frecuencia cardíaca con el esfuerzo percibido representa un avance significativo en la atención a pacientes cardiópatas. Sin embargo, es crucial desarrollar algoritmos que puedan adaptarse a las necesidades individuales de cada paciente, garantizando una retroalimentación segura. Este enfoque no solo tiene el potencial de mejorar la efectividad de los programas de rehabilitación cardíaca, sino también de prevenir eventos cardiovasculares adversos al proporcionar retroalimentación en tiempo real basada en el estado fisiológico del paciente.

III. HIPÓTESIS

El dispositivo brinda retroalimentación y asesoramiento personalizado durante las sesiones preventivas de accidentes cardiovasculares por exceso de esfuerzo en los pacientes y resuelve la carencia de programas de rehabilitación cardíaca sin supervisión

IV. Objetivos

General

Diseñar un dispositivo de monitorización para pacientes con cardiopatías, que brinde retroalimentación y asesoramiento durante sesiones de rehabilitación cardíaca mediante el análisis de la relación de la Escala de Borg con la frecuencia cardíaca de los pacientes que forman parte de los programas de rehabilitación cardíaca en REHADAPTA y el Hospital Regional de Alta Especialidad de la Península de Yucatán en Mérida, Yucatán.

Específicos

- Grabar las sesiones de rehabilitación a cinco pacientes cardiópatas durante una prueba de esfuerzo máxima y analizar la relación entre la FC y el esfuerzo percibido evaluado por la Escala de Borg
- Programar el sistema de alarma y retroalimentación del dispositivo mediante *IDE Arduino*
- Diseñar el modelo físico del dispositivo y determinar el material a usar
- Implementar el software en el diseño físico del dispositivo

V. Materiales y Métodos

a. Diseño del hardware

Utilizar Autodesk Fusion para crear un diseño detallado del prototipo del dispositivo, considerando aspectos ergonómicos, funcionales y estéticos. Esto implica modelar la carcasa del dispositivo, las sujeciones para los componentes y los espacios necesarios para el ensamblaje de manera precisa y eficiente.

Integrar la pantalla Nextion en el diseño de la carcasa, prestando especial atención a la ergonomía y la legibilidad de la información mostrada. Esto incluye considerar el ángulo de visión, el tamaño de la pantalla y la ubicación óptima para una interacción cómoda por parte del usuario.

Crear compartimentos específicos dentro de la carcasa para alojar cada componente electrónico con la finalidad de optimizar el espacio y facilitar el ensamblaje. Diseñar estos compartimentos teniendo en cuenta el tamaño y la forma de cada componente, así como la disposición de los cables y conexiones.

Implementar soportes adecuados para la bocina 8Ohms 7W dentro de la carcasa con el objetivo de asegurar una sujeción estable y una reproducción de audio eficiente. Diseñar estos soportes para evitar vibraciones no deseadas y garantizar una calidad de sonido óptima durante la reproducción.

Diseñar ranuras o compartimentos adicionales para el cableado y las resistencias cuidadosamente para garantizar una distribución ordenada y segura de los componentes eléctricos dentro del prototipo. Prestar especial atención a la gestión de cables para evitar interferencias y posibles daños en los circuitos. Realizar múltiples iteraciones del diseño en Autodesk Fusion para refinar y optimizar cada aspecto del prototipo, asegurando una integración adecuada de todos los componentes y una funcionalidad óptima del dispositivo.

b. Desarrollo del software

Programación en IDE Arduino

En el IDE Arduino, escribir un código estructurado y modular que permita controlar de manera eficiente todos los aspectos del prototipo, incluyendo la interfaz de usuario, la adquisición de datos del módulo ECG AD8232, la reproducción de audio desde la memoria Micro SD y la interacción con otros componentes.

Para la integración de la pantalla Nextion, utilizar las funciones y librerías proporcionadas por el fabricante para facilitar el desarrollo de la interfaz gráfica de usuario. Implementar comandos específicos para la comunicación bidireccional entre el Arduino Nano y la pantalla Nextion, permitiendo la visualización de datos en tiempo real y la interacción del usuario.

Desarrollar el código para la adquisición y procesamiento de las señales de ECG con especial atención a la precisión y la estabilidad de las mediciones. Implementar algoritmos de filtrado y procesamiento de señales para eliminar el ruido y obtener una representación clara de la actividad cardíaca del paciente. Programar funciones para la reproducción de audio desde la memoria Micro SD, leer archivos de audio almacenados en la tarjeta de memoria y reproducirlos a través de la bocina. Incluir controles de reproducción básicos, como reproducción, pausa y ajuste de volumen, para una experiencia de usuario intuitiva. Por último, codificar la lógica de control para la interacción del usuario teniendo en cuenta la facilidad de uso y la accesibilidad para pacientes con cardiopatías. Implementar menús intuitivos y opciones de configuración simples que permitan al usuario controlar el funcionamiento del dispositivo de manera efectiva.

Integración y pruebas

Integrar el código desarrollado con los componentes electrónicos del prototipo, asegurando una comunicación adecuada y un funcionamiento sin problemas. Realizar pruebas de conexión y comunicación entre el Arduino Nano y los diferentes componentes, verificando que todos los sistemas estén correctamente interconectados.

Verificar la visualización correcta de la información en la pantalla Nextion, la precisión de las mediciones de ECG y la reproducción de audio desde la memoria Micro SD durante las pruebas de funcionamiento del software. Realizar pruebas exhaustivas de todas las funciones y características del prototipo para identificar posibles errores o problemas de funcionamiento.

Corregir de inmediato cualquier error o problema identificado durante las pruebas, realizando modificaciones en el código según sea necesario. Llevar a cabo un proceso iterativo de depuración y optimización del software hasta obtener un funcionamiento óptimo y libre de errores.

Realizar una validación final del funcionamiento del prototipo una vez completadas las pruebas y correcciones necesarias. Verificar que cumpla con los requerimientos técnicos y funcionales establecidos, así como con las expectativas de rendimiento y usabilidad para su aplicación en la monitorización de pacientes con cardiopatías durante la rehabilitación cardíaca.

c. Ensamble físico

Imprimir las piezas de la carcasa y las sujetaciones en 3D con atención al detalle y utilizando un filamento de alta calidad para garantizar la resistencia y la durabilidad del prototipo. Utilizar parámetros de impresión adecuados para obtener resultados precisos y libres de defectos.

Prestar especial atención a la correcta colocación y conexión de cada componente durante el ensamblaje de los componentes electrónicos dentro de la carcasa según las especificaciones de diseño. Verificar

que todos los cables estén correctamente enrutados y que no haya interferencias entre los diferentes elementos.

Instalar la pantalla Nextion con cuidado para evitar daños en la pantalla y asegurar una conexión estable con el Arduino Nano. Prestar atención a la fijación adecuada de la pantalla dentro de la carcasa para evitar movimientos no deseados durante el uso.

Colocar la bocina 8Ohms 7W en su soporte correspondiente con la finalidad de garantizar una reproducción de audio clara y sin distorsiones. Prestar atención a la orientación y al ángulo de la bocina para maximizar la calidad del sonido y la cobertura del área de escucha.

Realizar una verificación exhaustiva de la integridad y la conexión de todos los componentes antes de cerrar la carcasa. Asegurar que no haya cables sueltos o componentes mal colocados que puedan afectar el funcionamiento del prototipo.

VI. Resultados

Como resultados principales se obtuvo el dispositivo de soporte para sesiones de rehabilitación cardíaca que brinda retroalimentación activa a los pacientes con insuficiencia cardíaca mediante la medida de su frecuencia cardíaca relacionada con la Escala de Borg que percibe. En la figura 1 podemos observar el dispositivo finalizado con la interfaz de la pantalla Nextion y la implementación de la bocina de 8Ohms.



Figura 1. Dispositivo con pantalla Nextion y bocina que brinda retroalimentación

En la figura 2 podemos observar la implementación de un circuito embebido que incluye el módulo AD8232, el módulo lector de Micro SD y la pantalla Nextion.

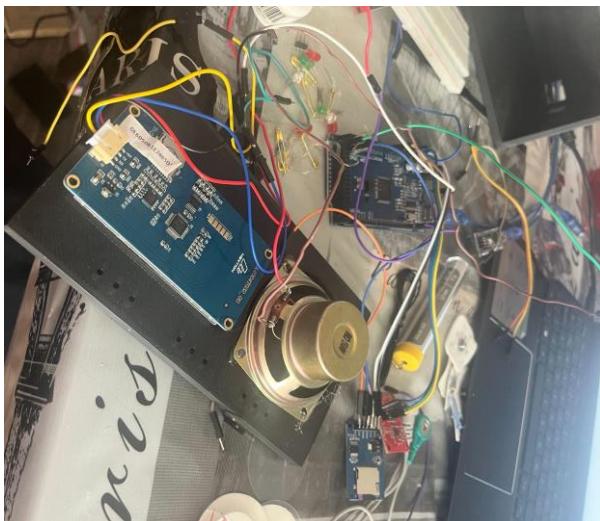


Figura 2. Parte interna del dispositivo con el módulo AD8232, sus respectivos latiguillos de una derivación y el módulo lector de micro SD para la reproducción de audio.

VII. Discusión

La implementación del dispositivo en centros de rehabilitación ha demostrado que es posible proporcionar retroalimentación inmediata y personalizada sobre el estado fisiológico del paciente, lo que mejora la seguridad y efectividad de las sesiones de rehabilitación, especialmente en entornos sin supervisión directa. Este hallazgo es consistente con estudios previos que destacan la importancia de la monitorización continua para prevenir complicaciones cardiovasculares (Stiller et al., 2013; Bourding et al., 2016). Además, la facilidad de uso del dispositivo permite su integración en programas de rehabilitación domiciliarios, abordando así una de las principales barreras para la participación en programas de rehabilitación: la falta de accesibilidad y recursos en centros públicos (Lara-Vargas, 2022).

La hipótesis principal del proyecto, que planteaba que el dispositivo proporcionaría retroalimentación y asesoramiento personalizado durante las sesiones para prevenir accidentes cardiovasculares por exceso de esfuerzo, se ha confirmado. El dispositivo ha demostrado su capacidad para correlacionar de manera efectiva la Escala de Borg con la frecuencia cardíaca, permitiendo ajustes en tiempo real de la intensidad del ejercicio basado en la condición específica del paciente. Esto coincide con los resultados de Hirschhorn et al. (2012), quienes encontraron que la Escala de Borg es una herramienta confiable para monitorear la intensidad del ejercicio.

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones. Una de las principales es que el dispositivo se probó en un entorno controlado, y su efectividad en escenarios no supervisados aún necesita ser evaluada a mayor escala. La precisión de la monitorización podría verse afectada por factores externos no considerados en el entorno clínico, como la adherencia del paciente al uso correcto del dispositivo y variaciones en las condiciones ambientales durante el uso en el hogar. Además, aunque el dispositivo integra elementos avanzados como la inteligencia artificial, la aceptación de esta tecnología en la comunidad médica puede ser un desafío debido a preocupaciones sobre la precisión y confiabilidad de las mediciones automatizadas (Velasco, 2023).

Para futuras investigaciones, se recomienda ampliar la muestra de pacientes y realizar estudios a largo plazo para evaluar la efectividad del dispositivo en diferentes etapas de la rehabilitación cardíaca y en entornos domiciliarios. Asimismo, sería beneficioso desarrollar algoritmos de aprendizaje automático más sofisticados que puedan adaptarse mejor a las características individuales de los pacientes y mejorar la precisión de la retroalimentación (Santos et al., 2019). La incorporación de más parámetros fisiológicos y la integración con otros dispositivos de monitoreo podrían optimizar aún más la personalización y efectividad de las sesiones de rehabilitación.

En conclusión, el dispositivo desarrollado representa un avance significativo en la rehabilitación cardíaca, proporcionando una solución accesible y efectiva para el monitoreo personalizado de la intensidad del ejercicio. Sin embargo, se requiere investigación adicional para validar su eficacia en escenarios no controlados y para mejorar su aceptación y aplicabilidad en la práctica clínica diaria.

VIII. Perspectivas a futuro

El desarrollo de dispositivos de soporte en la rehabilitación cardíaca, como el presentado en este proyecto, abre nuevas oportunidades para mejorar la atención y el monitoreo de pacientes con enfermedades cardiovasculares. A medida que la tecnología avanza, es crucial considerar varias áreas de desarrollo futuro que pueden maximizar el impacto positivo de estas innovaciones en la salud de los pacientes cardiópatas.

Inteligencia artificial y aprendizaje automático: La utilización de inteligencia artificial (IA) y algoritmos de aprendizaje automático puede mejorar significativamente la personalización del dispositivo de monitorización. Según la teoría de sistemas adaptativos, los modelos de IA pueden aprender y adaptarse a las necesidades individuales del paciente, ajustando las recomendaciones de ejercicio en tiempo real basado en los datos históricos y actuales del paciente (LeCun, Bengio, & Hinton, 2015). Integrar IA podría permitir una predicción más precisa de eventos adversos y la optimización de las rutinas de rehabilitación en función de patrones específicos de frecuencia cardíaca y esfuerzo percibido (Rashid et al., 2020).

Tecnologías portátiles y móviles: La integración de este dispositivo con tecnologías portátiles como relojes inteligentes y aplicaciones móviles puede facilitar el monitoreo continuo de los pacientes fuera del entorno clínico (Baig et al., 2017). Esto no solo podría mejorar la adherencia al programa de rehabilitación, sino también proporcionar datos más ricos y contextualizados sobre la actividad física del paciente en su vida diaria. El desarrollo de aplicaciones complementarias podría ofrecer soporte adicional a los pacientes y a los profesionales de la salud, brindando acceso a gráficos de progreso y recomendaciones personalizadas (Wang et al., 2019).

Variables adicionales de salud: Ampliar los parámetros monitoreados más allá de la frecuencia cardíaca y el esfuerzo percibido puede ofrecer una visión más completa de la salud del paciente. La inclusión de variables como la presión arterial, niveles de oxígeno en la sangre, y otros biomarcadores relevantes puede enriquecer la comprensión de la respuesta del paciente al ejercicio y mejorar la toma de decisiones clínicas (Piwek et al., 2016).

Interconexión de dispositivos de salud: Integrar el dispositivo con otros equipos médicos y sistemas de gestión de salud electrónica puede mejorar la coordinación del cuidado y la recopilación de datos. Según la teoría de redes en salud, la creación de un ecosistema interconectado de dispositivos puede mejorar la eficiencia del tratamiento y facilitar la intervención oportuna en caso de detección de anomalías (Raghupathi & Raghupathi, 2014).

Ensayos clínicos a gran escala: La realización de ensayos clínicos más amplios y estudios a largo plazo es esencial para validar la efectividad del dispositivo en diversos escenarios y poblaciones. Esto contribuirá a establecer la confianza en la comunidad médica y proporcionar evidencia robusta sobre los beneficios del dispositivo (Eysenbach, 2011).

Guías de implementación y formación: El desarrollo de guías claras para la implementación del dispositivo en la práctica clínica y la formación adecuada de los profesionales de la salud pueden

mejorar la adopción del dispositivo. La teoría de la difusión de innovaciones sugiere que la adopción exitosa de nuevas tecnologías depende de la comprensión de su uso y beneficios percibidos por los usuarios finales (Rogers, 2003).

Desarrollo de versiones asequibles: Crear versiones del dispositivo más accesibles y económicas puede permitir su adopción en centros de rehabilitación con recursos limitados y en regiones con menos infraestructura médica (World Health Organization, 2018). Esto es crucial para expandir el acceso a la rehabilitación cardíaca a poblaciones más amplias, especialmente en áreas rurales y de bajos ingresos.

Expansión a mercados internacionales: Evaluar y adaptar el dispositivo para su uso en diferentes contextos internacionales puede ayudar a abordar la necesidad global de soluciones de rehabilitación cardíaca eficaces y accesibles. La consideración de factores culturales y regulaciones locales será clave para una expansión exitosa (Eaton et al., 2011).

En resumen, el futuro del dispositivo de soporte en la rehabilitación cardíaca es prometedor, con un potencial significativo para mejorar la atención a los pacientes a través de la integración de nuevas tecnologías, la expansión de parámetros monitoreados, la validación clínica continua, y la accesibilidad global. Estos avances pueden transformar la manera en que se gestiona la rehabilitación cardíaca, ofreciendo una atención más personalizada, eficiente y accesible.

En conclusión, el dispositivo desarrollado representa un avance significativo en la rehabilitación cardíaca, proporcionando una solución accesible y efectiva para el monitoreo personalizado de la intensidad del ejercicio. Sin embargo, se requiere investigación adicional para validar su eficacia en escenarios no controlados y para mejorar su aceptación y aplicabilidad en la práctica clínica diaria.

IX. Referencias

1. Baig, M. M., Gholamhosseini, H., & Connolly, M. J. (2017). Smart health monitoring systems: An overview of design and modeling. *Journal of Medical Systems*, 41(7), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10916-017-0755-8>
2. Bezerra, L., Ronto, R., Chau, J., Chow, C. & Laranjo, L. (2022) *Use of Mobile Apps in Heart Failure Self-Management: Qualitative Study Exploring the Patient and Primary Care Clinician Perspective.* Journal of Medical Internet Research. Vol. 6. <https://cardio.jmir.org/2022/1/e33992#app1> doi:10.2196/33992
3. Bourding, R., et al. (2016). Early mobilization after cardiac surgery: A systematic review. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 48(2), 123-130. <https://doi.org/10.2340/16501977-2053>
4. Burkhalter, N. (1996) Evaluación de la escala de Borg de esfuerzo percibida en la rehabilitación cardiaca. *Revista Latinoamericana Erfermagem.* Vol. 4. DOI:10.1590/S0104-11691996000300006
5. Eaton, L., Garmhausen, J., Ott, S., & Krishnamurthi, R. (2011). The future of global health: Transforming through technology. *Technology and Health Care*, 19(6), 341-351. <https://doi.org/10.3233/THC-2011-0666>
6. Eysenbach, G. (2011). Evidence-based practice in e-health: Implications for policy and practice. *Journal of Medical Internet Research*, 13(4), e94. <https://doi.org/10.2196/jmir.1829>
7. Fagherazzi, G., Fischer, A., Ismael, M. & Despotovic, V. (2021) *Voice for Health: The Use of Vocal Biomarkers from Research to Clinical Practice.* Karger Publishers Vol. 5 <https://karger.com/dib/article-pdf/5/1/78/2576243/000515346.pdf> DOI: 10.1159/000515346
8. Hirschhorn, R., et al. (2012). Application of Borg's rating of perceived exertion in patients with heart failure: Accuracy and implications for exercise prescription. *Heart & Lung*, 41(5), 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.hrtlng.2011.09.003>
9. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2023) MÓDULO DE PRÁCTICA DEPORTIVA Y EJERCICIO FÍSICO (MOPRADEF) Inegi: México <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/mopradef/mopradef2022.pdf>
10. Jaskanwal, S., Orbelo, D., Elad, M., Lerman, L. O. & Lerman, A. (2023) *Guess What We Can Hear – Novel Voice Biomarkers for the Remote Detection of Disease.* Mayo Clinic Proceedings. Vol. 98. <https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2023.03.007>
11. Johannes, S. (2013). Association between the Borg Scale of perceived exertion and physiological parameters in exercise intensity. *European Journal of Cardiovascular Nursing*, 12(4), 345-351. <https://doi.org/10.1177/1474515112449188>
12. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

13. Lieshout, P. V. (2017) *PRAAT: Short Tutorial*. University of Toronto, Department of Speech-Language Pathology, Faculty of Medicine, Oral Dynamics Lab. https://www.researchgate.net/publication/270819326_PRAAT--Short_Tutorial--An_introduction
14. Lara-Vargas, R. (2022). Third National Registry of Cardiac Rehabilitation Programs in Mexico. Revista Mexicana de Cardiología, 33(3), 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.revmexcard.2022.02.001>
15. Lara-Vargas, J. A., Ilárraza-Lomelí, H., García-Saldivia, M., Pineda-García, A. D., Leyva-Valadez, E. A., Justiniano-Cordero, S., Sahagún-Olmos, R., Zavala-Ramírez, J., Cassaigne-Guasco, M. E., Sánchez-Limón, E., Castañeda-López, J., Cerón-Enríquez, N., Ku-González, A., Arteaga-Martínez, R., Hinojosa-López, T., Vergara-Guzmán, J., Pérez-Vázquez, D. I., Gasca-Zamudio, P. D., Aranda-Ayala, Z., Rius-Suárez, M. (2023). *Tercer Registro Nacional de Programas de Rehabilitación Cardiaca en México (RENAPREC III-2022)*. Archivos de cardiología de México, 93(4). <https://doi.org/10.24875/acm.22000235>
16. Murton, O. M., Dec, G. W., Hillman, R. E., Dajmudar, M., Steiner, J., Guttag, J. & Mehta, D. (2023) *Acoustic Voice and Speech Biomarkers of Treatment Status during Hospitalization for Acute Decompensated Heart Failure*. Appl. Sci. Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/app13031827>
17. Piwek, L., Ellis, D. A., Andrews, S., & Joinson, A. (2016). The rise of consumer health wearables: Promises and barriers. PLOS Medicine, 13(2), e1001953. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001953>
18. Ravindra, N. & Kao, D. P. (2022) *Extracting Vocal Biomarkers for Pulmonary Congestion With a Smartphone App*. Journal of the American College of Cardiology. Vol. 10. <https://www.jacc.org/doi/epdf/10.1016/j.jchf.2021.10.007>
19. Santos, S., et al. (2019). Impact of early mobilization on functional recovery after cardiac surgery: A meta-analysis. Annals of Thoracic Surgery, 108(5), 1485-1492. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2019.05.029>
20. Stiller, K., et al. (2013). Early mobilization after cardiac surgery: Evidence and recommendations. Australian Critical Care, 26(1), 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.aucc.2013.02.001>
21. Tal, T. (2023) *How voice biomarker AI can transform early disease diagnoses*. Med Tech Innovation News. AI in Healthcare Insights. <https://www.med-technews.com/medtech-insights/ai-in-healthcare-insights/how-voice-biomarker-ai-can-transform-early-disease-diagnoses/>
22. Tracey, B., Patel, S., Zhang, Y., Chappie, K., Volfson, D., Parisi, F., Adans-Dester, C., Bertacchi, F., Bonato, P. & Wacnik (2022) *Voice Biomarkers of Recovery from Acute Respiratory Illness*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal of Biomedical and

Health

Informatics.

Vol.

26.

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9658158>

23. Velasco, C. (2023). HearOTM: Speech as a biomarker for heart failure. *Digital Health*, 7(1), 112-118. <https://doi.org/10.1177/2055207623112153>
24. Wang, R., Blackburn, G., Desai, M., Phelan, D., Gillinov, L., Houghtaling, P., ... & Gillinov, M. (2019). Accuracy of wrist-worn heart rate monitors. *JAMA Cardiology*, 2(1), 104-106. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2016.3340>
25. World Health Organization. (2018). Global status report on noncommunicable diseases 2018. World Health Organization.