



*Aseorías y Tutorías para la Investigación Científica en la Educación Puig-Salabarría S.C.
José María Pino Suárez 400-2 esq a Lerdo de Tejada, Toluca, Estado de México. 7223898475*

RFC: ATI120618V12

Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores.

<http://www.dilemascontemporaneoseduccionpoliticaayvalores.com/>

Año: X Número: 3. Artículo no.:60 Período: 1ro de mayo al 31 de agosto del 2023

TÍTULO: Propuesta de diseño conceptual de dispositivo de rehabilitación pulmonar para pacientes recuperados de COVID-19.

AUTORES:

1. Máster. Luis Angel Ortiz-Lango.
2. Dr. Israel Miguel-Andrés.

RESUMEN: En este trabajo se presenta una propuesta de diseño conceptual de dispositivo de rehabilitación pulmonar para pacientes recuperados de COVID-19 con sintomatología leve y moderada y con afecciones en su vida diaria. La propuesta de diseño consta de cuatro sistemas: uno de control y monitoreo, otro sistema de restricción de respiración torácica, un sistema inhibidor de movimiento clavicular y un sistema de vibración.

PALABRAS CLAVES: COVID-19, post-COVID, rehabilitación pulmonar, diseño, sistema.

TITLE: Conceptual design proposal for a pulmonary rehabilitation device for patients recovered from COVID-19.

AUTHORS:

1. Master. Luis Angel Ortiz-Lango.
2. PhD. Israel Miguel-Andrés.

ABSTRACT: This paper presents a conceptual design proposal for a pulmonary rehabilitation device for patients recovered from COVID-19 with mild and moderate symptoms and with conditions in their daily lives. The design proposal consists of four systems: one control and monitoring, another chest breathing restriction system, a clavicular movement inhibitor system and a vibration system.

KEY WORDS: COVID-19, post-COVID, pulmonary rehabilitation, design, system.

INTRODUCCIÓN.

La COVID-19 es una enfermedad vírica muy infecciosa que es considerada respiratoria, pues afecta con mayor intensidad a los pulmones por su mayor concentración del receptor ECA-2 en sus células epiteliales. La unión con el virus atenúa la actividad de este receptor llevando hacia la vasoconstricción pulmonar y el daño orgánico inflamatorio y oxidativo que puede causar importantes secuelas respiratorias y físicas a corto y largo plazo que requieren la aplicación de técnicas de rehabilitación enfocadas a cada paciente con el objetivo de mejorar la sensación disnea, preservar la función pulmonar, mejorar la disfunción y la calidad de vida (Martínez-Pizarro, 2020).

De acuerdo con Gloeckl et al., (2021), de los pacientes que tienen la enfermedad, el 80% presenta síntomas como tos, fiebre, dolor de cabeza, cansancio y en algunos casos pérdida de gusto y olfato, considerándose estos casos como una enfermedad leve a moderado; por otro lado, el 15% se les considera grave debido a una baja oxigenación en la sangre y dificultad para respirar, lo que en ocasiones requieren de asistencia médica con la colocación de oxígeno en las vías respiratorias; finalmente, el 5% en estado crítico presentan daño alveolar resultado de la insuficiencia respiratoria aguda hipoxémica y fibrosis pulmonar que conlleva el uso de ventilación mecánica.

Con la llegada de las vacunas, los casos graves de COVID-19 vinieron en disminución (Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades, 2022), con estas se reduce el riesgo de complicaciones de la enfermedad, inclusive se redujo el riesgo de enfermarse gravemente y morir; sin embargo, se comenzaron a presentar casos en que los pacientes presentaban síntomas prolongados posteriores a la recuperación de la COVID-19. Algunos investigadores han identificado esta situación y propuesto el término COVID-19 prolongado o síndrome Post-COVID. El National Institute for Health and Care Excellence (NICE) lo define como los signos y síntomas que se desarrollan durante o después de una infección compatible con

COVID-19, que persisten más allá de las 12 semanas y no se explican mediante un diagnóstico alternativo (National Institute for Health and Care Excellence et al., 2022).

De acuerdo con Wong Chew et al., (2021), los principales síntomas que se presentan son fatiga, debilidad muscular, dificultad para dormir, ansiedad o depresión y anomalía en difusión pulmonar. Estos síntomas se han presentado a las 36 semanas posteriores a la recuperación.

En este sentido, los resultados preliminares publicados en la literatura como el estudio realizado por Herrera-García et al., (2020) muestran que el 84% de los pacientes presentan síntomas persistentes como fatiga (84%), cansancio y debilidad (84%), opresión torácica (80%) y tos (60%). En general, los síntomas parecen ser más frecuentes en pacientes con una enfermedad inicial grave; no obstante, también se han observado en personas con una infección leve.

Ante este panorama, la disminución de la función pulmonar ha traído diferentes limitaciones en las actividades de la vida diaria de las personas. Autores como Carod Artal (2021) concuerdan que la característica más distintiva de estos pacientes es el cansancio, que no solo significa sentirse cansado, sino estar profundamente fatigado; además, de la “falta de aire”, la debilidad muscular y el deterioro del rendimiento físico. Esto conlleva que la atención no solo se limita a la recuperación de la enfermedad sino también al manejo de esta en las semanas posteriores a la recuperación; incluso pudiendo necesitarse de rehabilitación para recuperar la función pulmonar.

En una revisión sistemática reciente, Gloeckl et al. (2021) determinó que la rehabilitación pulmonar es factible con una tasa de adherencia muy alta de las sesiones de rehabilitación pulmonar, segura y beneficiosa para mejorar el rendimiento del ejercicio, la función pulmonar y la calidad de vida en pacientes con secuelas persistentes debido al COVID-19. Por otro lado, algunos autores como Spielmanns et al., (2021) investigaron los efectos de un programa de rehabilitación con 99 pacientes con COVID-19 grave; sus hallazgos determinaron que la rehabilitación pulmonar es efectiva en la recuperación del estado de salud de esos pacientes. Un estudio más como el mostrado por Siddiq et al. (2021) concluyen que la

rehabilitación pulmonar debe ser individualizada y estar dirigida por un enfoque multidisciplinario para aumentar considerablemente la probabilidad de resultados positivos.

En concreto, una atención especializada y personalizada a pacientes con el síndrome post-COVID traerá como resultado una mejora en sus funciones pulmonares, rendimiento físico, y por consiguiente, un mejoramiento de la calidad de vida en sus actividades diarias.

Se ha realizado un proyecto con el objetivo de desarrollar un diseño preliminar de un dispositivo de rehabilitación pulmonar para pacientes recuperados de COVID-19 con sintomatología leve y moderada con afecciones en sus actividades de vida diaria. En el presente trabajo se presenta un resumen del primer diseño conceptual del dispositivo y el diseño de la interfaz y lógica de control de este.

DESARROLLO.

Análisis de la necesidad y planteamiento del problema.

De acuerdo con la revisión de información y el análisis de artículos es importante llevar a cabo una correcta respiración, pues el oxígeno es nuestra principal fuente de energía, y al no realizar una respiración completa, el oxígeno administrado al cuerpo es menor, y por tanto, el trabajo cardiovascular aumenta así como la cantidad de dióxido de carbono en el organismo, y al hacerlo de manera cotidiana, disminuye la elasticidad del pulmón, por tanto disminuye la resistencia ante un esfuerzo; además, como cualquier otro músculo, para que el diafragma haya su trabajo, requiere ejercitarse, eso lo logramos con una respiración profunda. De acuerdo con Cristancho Gómez (2015), hay tres tipos de respiración:

- Diafragmática - abdominal o baja (utiliza menos energía para respirar, estimula la circulación de los órganos abdominales, mientras los pulmones aumentan su capacidad respiratoria).
- Pulmonar - torácica o intercostal (se lleva a cabo gracias a los músculos de las costillas. Mayor resistencia al aire).
- Clavicular o alta (requiere un mayor esfuerzo y obtiene poco aire, en ella, los hombros y la clavícula se levantan mientras se contrae el abdomen).

En este sentido, la respiración completa incluye a las tres ya mencionadas, pues cada una de ellas se encarga de llenar una porción de los pulmones; la respiración diafragmática, llena la parte más distal del pulmón, la torácica, la parte media, y la respiración alta, la parte más alta de este órgano.

En conclusión, para el desarrollo de un dispositivo capaz de rehabilitar los pulmones, es importante considerar la respiración completa en los tres tipos mencionados anteriormente. Para ello, se centró la atención en considerar cada una de ellas y establecer un sistema de control que permita operar cada sistema de manera individualizada.

Un análisis más a fondo por medio de consultas con clínicas de medicina general y observación directa; además, de un análisis de la bibliografía para identificar la población objetivo del dispositivo, permitió definir a pacientes entre 35 y 57 años con compromiso pulmonar, que presenten sintomatología relacionada al síndrome post-COVID (tos, fatiga, opresión torácica) posteriores a las 12 semanas de recuperación de la enfermedad como población objetivo. Algunas características demográficas, fisiológicas, antropométricas y clínicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de características demográficas, fisiológicas, antropométricas y clínicas de la población de estudio. Adaptado de Zampogna et al. (2021).

Edad, años	46.25 (35.5-57.0)
Hombres, n (%)	95 (67.8)
IMC, kg/m ²	25.2 (23.2-29.3)
Oxígeno previo requerido, n (%)	117 (83.6)
pH (n=130)	7.43 (7.40-7.45)
CIRS-SI, puntaje	1.6 (1.60–2.1)
CIRS-CI, puntaje	4.0 (3.0–5.0)

Los datos están expresados como n (%). IMC, índice de masa corporal; VI; Ventilación no Invasiva; FiO₂ fracción inspirada de oxígeno; CIRS-SI, índice de gravedad de calificación de enfermedad acumulativa; CIRS-CI, índice de comorbilidades de la calificación de enfermedad acumulada.

Métricas.

Una vez se definieron las características de la población de estudio, se evaluaron las métricas base para el diseño del dispositivo, las métricas consideradas para el diseño fueron las mostradas en la Tabla 2. Con ello se clasificaron grados de severidad del paciente.

Tabla 2. Métricas base para el desarrollo del diseño conceptual del dispositivo de rehabilitación pulmonar.

Métrica	Condición Normal	C. Leve	C. Moderada	C. Aguda
Oximetría	95-99%	94-91%	86-90%	<86%
SPPB	11-12 normales	10-9 discapacidad leve	3-8 discapacidad moderada	1-2 grave
Espirometría (volumen total espirado)	>80	65-80	50-65	<35-50
Las métricas son los parámetros que se deben considerar para utilizar el dispositivo de rehabilitación; estas deben ser tomadas antes de usar el dispositivo.				

Requerimientos funcionales para la rehabilitación pulmonar.

De acuerdo con Cristancho Gómez (2015), para los pacientes que presentan tos seca o purulenta, existe un método a través de la vibración o percusión que estimula la movilidad a través de las ondas que llegan al árbol bronquial y bases pulmonares para el flujo de la mucosidad que se encuentra adherida; por otro lado, la restricción abdominal favorece a la tonificación del core por medio de estímulos compresivos a diferentes niveles de presión, que hace más eficiente controlar la respiración diafragmática y los ciclos de ventilación.

Finalmente, otro aspecto a considerar es la inhibición de los movimientos torácicos al producir respiraciones cortas y de poco volumen; por tanto, se busca trabajar la respiración diafragmática y de caja de manera conjunta.

En ese sentido, en la Tabla 3 se muestran los criterios de diseño para el desarrollo del diseño conceptual tomando como base lo mencionado anteriormente.

Tabla 3. Requerimientos para el diseño de dispositivo de rehabilitación pulmonar.

Requerimiento	Descripción	Forzoso	Deseable	Observaciones
Costo	Que tenga un bajo costo		X	Buscar elementos comerciales y de fácil acceso
Elemento de restricción diafragmática	El dispositivo debe tener un elemento que permita controlar la presión sobre la zona diafragmática	X		Debe ser controlable
Monitoreo	Sistema de monitoreo de métricas base (oximetría, latidos por minuto)		X	Que esté integrado al dispositivo
Vibración	Dispositivo integrado de vibraciones	X		Ninguna
Inhibidor de movimiento torácico	Sistema que permita controlar los movimientos torácicos	X		Ninguna
Los requerimientos forzosos son los requerimientos establecidos como obligatorios a cumplir con el dispositivo de rehabilitación, por otro lado, los deseable son requerimientos que se pueden prescindir de ellos.				

Diseño Conceptual de Dispositivo de rehabilitación.

Sumándose a las alternativas de rehabilitación pulmonar en las que únicamente se ha atacado el problema mediante cursos, programas de ejercicios, sin la medición y utilización de dispositivos especializados, se ha desarrollado un primer diseño conceptual inicial para proporcionar una alternativa tecnológica capaz de auxiliar al personal calificado en la rehabilitación de pacientes que presentan secuelas posteriores a la recuperación del COVID-19.

A diferencia de otros prototipos identificados en una revisión de patentes y modelos de utilidad, este diseño incorpora 4 elementos en conjunto para dar un seguimiento a la recuperación del paciente. El dispositivo de rehabilitación pulmonar propuesto se puede dividir en 4 sistemas: el sistema de control, un sistema de vibración, el sistema de restricción torácica, y el sistema inhibidor de movimiento.

El funcionamiento propuesto se basa en identificar la severidad de las secuelas presentadas a través de métricas establecidas, mismas que fueron descritas. El rehabilitador, fisioterapeuta o médico tratante deberá medir estos valores que sirven como dato de entrada para establecer el nivel de severidad, y con ello, la programación del dispositivo permitirá asignar a través de la interfaz dicho grado para proceder a hacer recomendaciones de los niveles a utilizar de los sistemas restantes. El diagrama de flujo de funcionamiento se muestra en la Figura 1.

Posterior a ello, el rehabilitador podrá programar el tiempo y niveles conforme a las recomendaciones y utilizar el dispositivo en conjunto con los pacientes. A la par, se estarán monitoreando los valores de oximetría y frecuencia cardíaca para un seguimiento más puntual.

A continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los sistemas propuestos en el diseño conceptual.

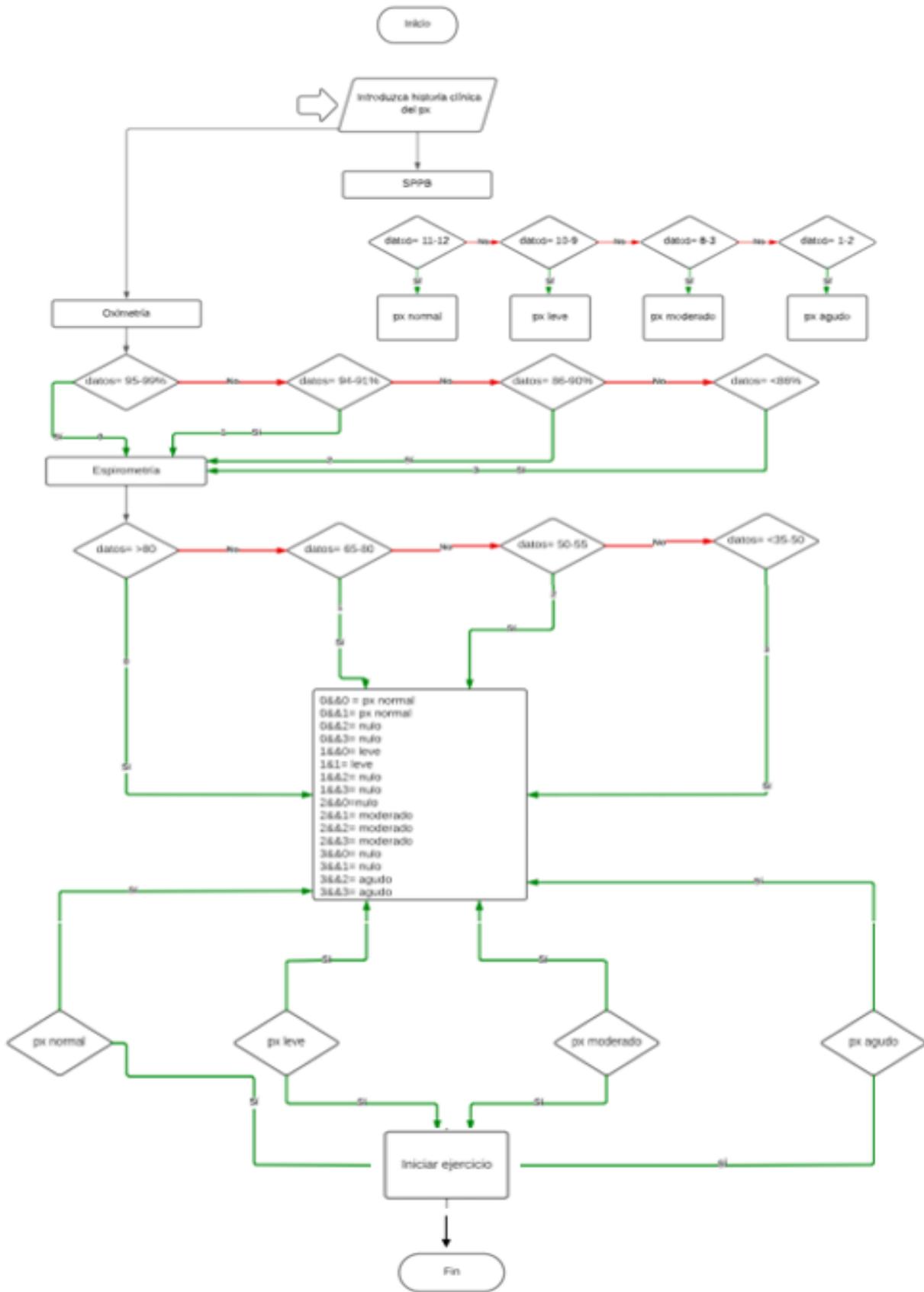


Figura 1. Diagrama de flujo de funcionamiento de dispositivo de rehabilitación pulmonar.

Sistema de Control.

Circuito electrónico.

El sistema de control y monitoreo está compuesto por un microcontrolador ESP32 necesario para establecer la programación de sincronía con motores y la conexión con los sensores y periféricos del dispositivo; una etapa de potencia para controlar el nivel de vibraciones a través de un circuito integrado UNL2803A; una pantalla Human Machine Interface (HMI) marca Nexion de 7" modelo NX8048T070_011 para la visualización del menú de utilización; sensor analógico de presión de aire de 1.2 MPa, y sensor de frecuencia cardiaca y saturación de oxígeno. Se diseñó una tarjeta de circuito con componentes Truehold y SMD (de montaje superficial) para facilidad de desarrollo posterior del dispositivo tal y como se muestra en la Figura 2.

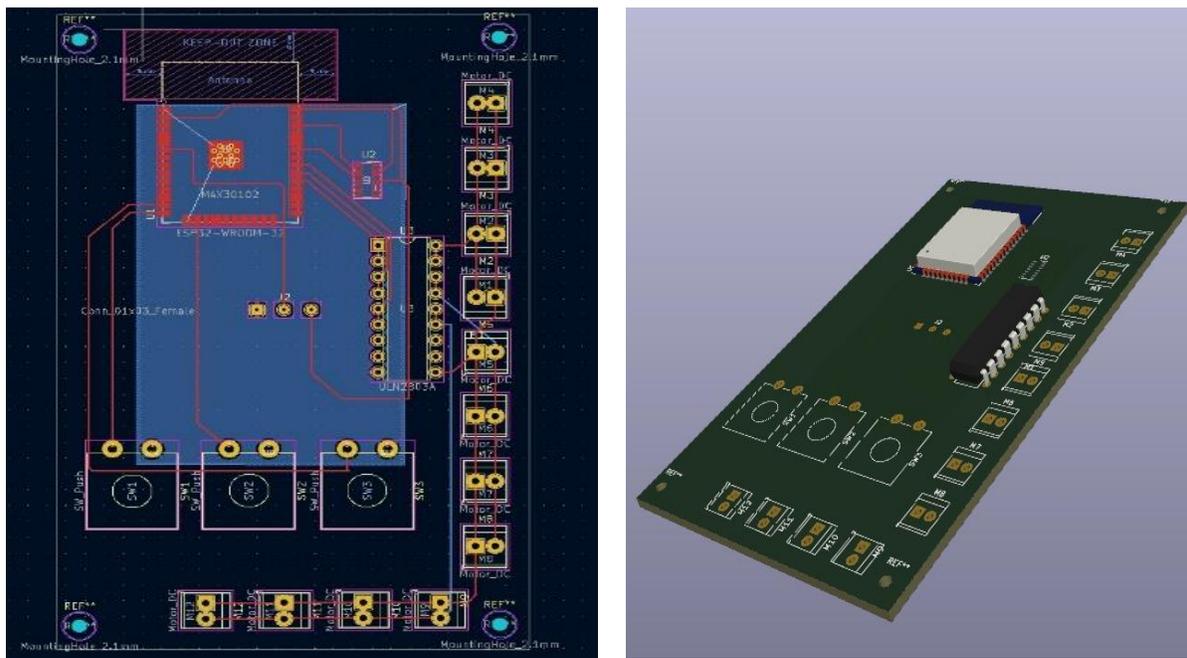


Figura 2. Placa de circuito para sistema de control y monitoreo.

En la Figura 3 se muestra un esquemático de las conexiones del circuito, mediante un switch que controla la alimentación de voltaje (12 volts), se encenderá el dispositivo, y posteriormente, la alimentación

permitirá dar energía al circuito integrado de programación, el cual controla tres botones para establecer el nivel de cada sistema de manera individual, a la par se controlan los 6 motores colocados en las diferentes zonas de la parte posterior del dispositivo.

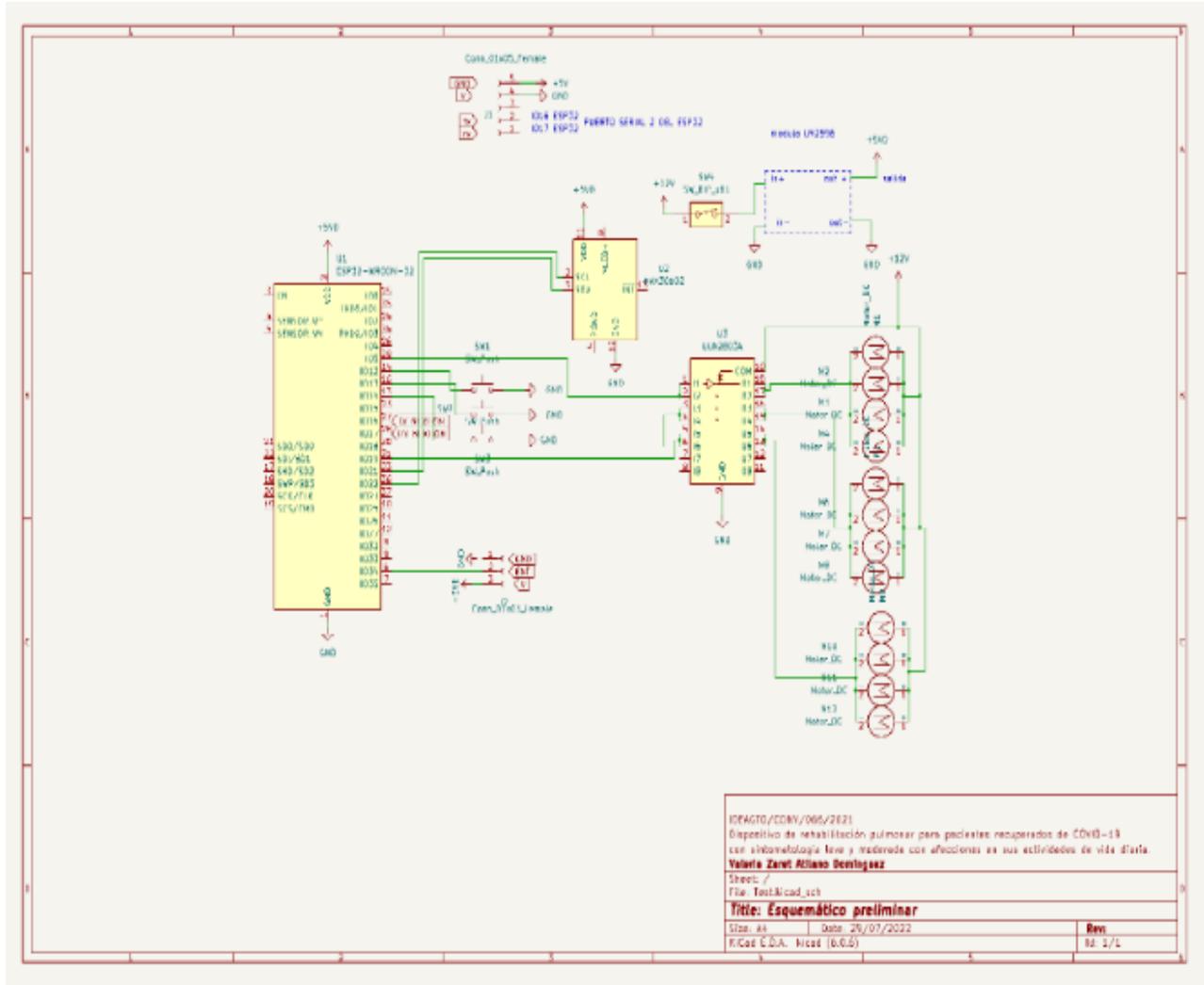


Figura 3. Esquema de conexiones del circuito de control.

Interfaz.

La interfaz cuenta con una pantalla de presentación con un botón para comenzar la aplicación. Una vez iniciada la interfaz, se pedirán datos personales y clínicos obtenidos a partir de mediciones por personal calificado (oximetría, volumen espiratorio forzado y flujo máximo PEF FEV1, EPPB). Posteriormente, se mostrará una pantalla con la clasificación del paciente tomando como base los datos ingresados; esta

clasificación es normal, leve, moderada y aguda. En esta pantalla también se puede optar por ingresar de forma manual el nivel de presión para el sistema de restricción torácica, el nivel de vibración, y a su vez, el tiempo de duración de cada uno de estos niveles. A la par, la interfaz muestra datos en tiempo real de frecuencia cardíaca y oximetría en una gráfica, así como los datos ingresados al inicio. También se contempla la posibilidad de exportar los datos a través de bluetooth. La interfaz HMI se muestra en la Figura 4.

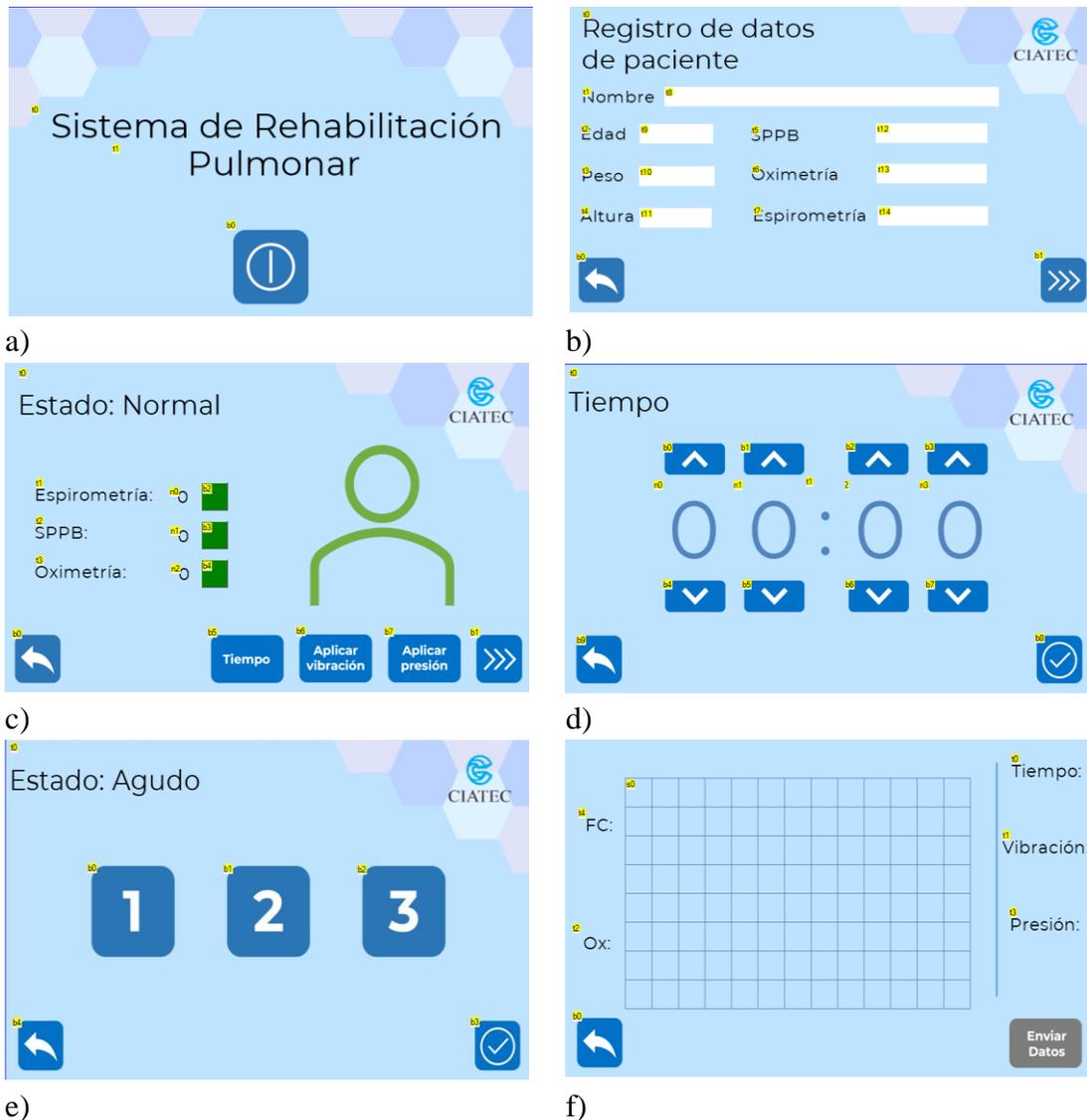


Figura 4. Interfaz gráfica de dispositivo de rehabilitación pulmonar: a) Pantalla de inicio; b) Pantalla de registro de datos; c) Pantalla de estado del paciente; d) Pantalla de programación manual de tiempo; e) Pantalla de programación de nivel para presión y vibración; f) Pantalla de Monitoreo.

Sistema de vibración.

El sistema de percusión y vibración está compuesto por 6 motores Rumble de 12 volts con un contrapeso para provocar las vibraciones colocados en la parte posterior del chaleco rehabilitador, y se colocan de acuerdo a la zona del pulmón (anterior distal, anterior media, anterior proximal, posterior distal, posterior media y posterior proximal), tal y como se muestra en la Figura 5. Este sistema esta controlado en tres niveles de vibración.



Figura 5. Sistema de vibración.

Sistema de Restricción torácica.

El sistema de restricción torácica está compuesto por varios compartimentos de inflado automático conforme al nivel establecido, y estos se controlan a partir de un disparador de aire en tres niveles para restringir la respiración diafragmática y trabajar el core abdominal. El diseño conceptual se basa en

incorporar un sensor industrial de presión de aire, el cual tendrá una entrada analógica y su respectiva alimentación; este sensor servirá como un Baumanómetro en el dispositivo para poder “activar” el mecanismo de inflado de los compartimentos, y por consiguiente, tener una restricción en la respiración torácica. El sistema de restricción torácica se muestra en la Figura 6.

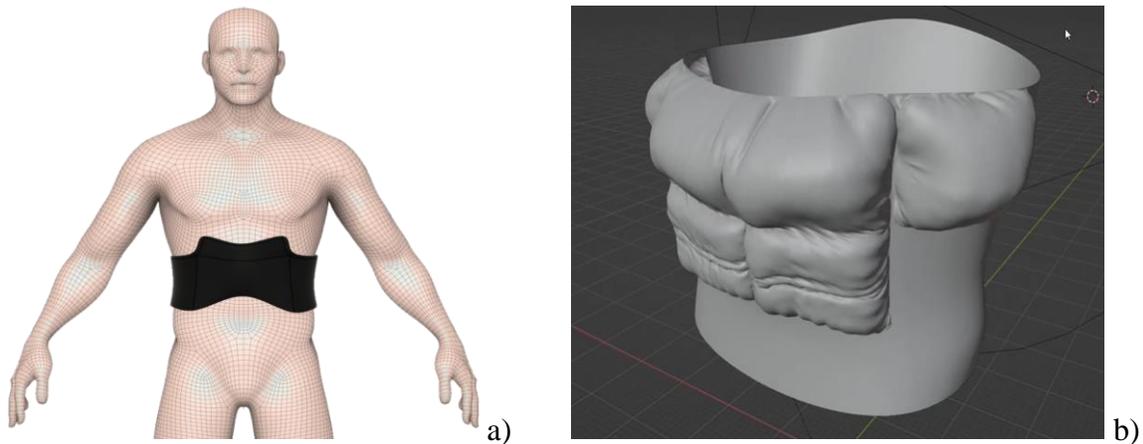


Figura 6. Sistema de restricción torácica: a) zona de restricción diafragmática acoplada al chaleco; b) compartimentos llenos de aire para permitir la restricción de respiración torácica.

Sistema inhibidor de movimiento.

El sistema inhibidor de movimiento está compuesto por un elemento con pesos establecidos, permitiendo ser intercambiable en la zona de los hombros, y con ello se limita el movimiento de los hombros durante las respiraciones profundas, permitiendo que el movimiento de respiración sea forzado hacia la zona abdominal, favoreciendo la respiración diafragmática para la rehabilitación (Figura 7).



Figura 7. Sistema inhibidor de movimiento.

CONCLUSIONES.

La pandemia de COVID-19 trajo consigo no solo millones de muertes sino también, posterior a ello, con la llegada de las vacunas, secuelas que han sido documentadas en diferentes artículos alrededor del mundo; prueba de ello, es la aparición del síndrome post-COVID. Las personas han mostrado síntomas que afectan sus actividades de vida diaria y como se mencionó al inicio de este trabajo, en varios lados del mundo se han hecho esfuerzos para mitigar estas afectaciones.

La propuesta de diseño conceptual que se presenta, para un dispositivo de rehabilitación pulmonar fundamentada en el estado del arte, es de vital importancia para realizar una rehabilitación mas focalizada e individualizada por parte de los rehabilitadores.

En ese sentido, el diseño propuesto cuenta con las funciones básicas necesarias para poder concentrarse en cada tipo de respiración presente en un ciclo respiratorio ideal. Esto justifica la necesidad de continuar con el desarrollo tecnológico de éste, considerando la siguiente etapa que consiste en un diseño a detalle, incluyendo los materiales de fabricación, la manufactura, el ensamble, y posteriormente, el desarrollo de

un primer prototipo; con ello, se podrán realizar pruebas de funcionamiento de cada sistema, y a su vez observar el comportamiento a través de un modelo anatómico de pulmón; en vías, de posteriormente desarrollar un dispositivo asequible a todo público para mitigar los efectos del síndrome post-COVID en temas respiratorios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Carod Artal, F. J. (2021). Síndrome post-COVID-19: epidemiología, criterios diagnósticos y mecanismos patogénicos implicados. *Revista de Neurología*, 72(11), 384. <https://doi.org/10.33588/rn.7211.2021230>
2. Crispancho Gómez, W. (2015). *Fundamentos de fisioterapia respiratoria y ventilación mecánica* (3a ed.). Manual moderno.
3. Gloeckl, R., Leitl, D., Jarosch, I., Schneeberger, T., Nell, C., Stenzel, N., Vogelmeier, C. F., Kenn, K., & Koczulla, A. R. (2021). Benefits of pulmonary rehabilitation in COVID-19: a prospective observational cohort study. *ERJ Open Research*, 7(2), 00108–02021. <https://doi.org/10.1183/23120541.00108-2021>
4. Herrera-García, J. C., Arellano-Montellano, E. I., Juárez-González, L. I., & Contreras-Andrade, R. I. (2020). Persistencia de síntomas en pacientes después de la enfermedad por coronavirus (COVID-19) en un hospital de tercer nivel de Puebla, México. <https://doi.org/10.24245/mim.v36i6.4581>
5. Martínez-Pizarro, S. (2020). Respiratory rehabilitation in patients with COVID-19. In *Rehabilitacion* (Vol. 54, Issue 4, pp. 296–297). Ediciones Doyma, S.L. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2020.04.002>
6. National Institute for Health and Care Excellence, Scottish Intercollegiate Guidelines Network, & Royal College of General Practitioners. (2022). COVID-19 rapid guideline: managing the long term effects of COVID-19.

7. Siddiq, M. A. B., Rathore, F. A., Clegg, D., & Rasker, J. J. (2021). Pulmonary rehabilitation in COVID-19 patients: A scoping review of current practice and its application during the pandemic. In *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* (Vol. 66, Issue 4, pp. 480–494). Turkish Society of Physical Medicine and Rehabilitation. <https://doi.org/10.5606/TFTRD.2020.6889>
8. Spielmanns, M., Pekacka-Egli, A. M., Schoendorf, S., Windisch, W., & Hermann, M. (2021). Effects of a comprehensive pulmonary rehabilitation in severe post-covid-19 patients. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052695>
9. Wong Chew, R. M., Ángel Ambrocio, A. H., Bautista Carbajal, P., García León, M. L., Vite Velázquez, X., Cortázar Maldonado, L. A., Díaz Ramírez, J. B., Valadez González, Y., Vásquez Martínez, L. M., García Osorno, Z. R., Perón Medina, L. Á., Ramírez Velázquez, I. O., Chávez Aguilar, J. E., Cruz Salgado, A. X., Morales Fernández, J. A., Joaquín Vilchis, H., Mosqueda Martínez, E. E., & Gutiérrez Bautista, D. (2021). Efectos a largo plazo de la COVID-19: una revisión de la literatura. *Acta Médica Grupo Ángeles*, 19(3), 421–428. <https://doi.org/10.35366/101741>
10. Zampogna, E., Paneroni, M., Belli, S., Aliani, M., Gandolfo, A., Visca, D., Bellanti, M. T., Ambrosino, N., & Vitacca, M. (2021). Pulmonary Rehabilitation in Patients Recovering from COVID-19. *Respiration*, 100(5), 416–422. <https://doi.org/10.1159/000514387>

DATOS DEL AUTOR.

1. **Luis Angel Ortiz-Lango.** Maestro en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Industrial. Consultor en el laboratorio de biomecánica del CIATEC, A.C. México. Correo electrónico: lortiz@ciatec.mx

2. **Israel Miguel-Andrés**. Doctor en Ingeniería Mecánica con especialidad en biomecánica. Responsable del laboratorio de biomecánica del CIATEC, A.C. México. Correo electrónico: imiguel@ciatec.mx

RECIBIDO: 4 de enero del 2023.

APROBADO: 28 de enero del 2023