

# SISTEMA HW-SW DE TELEREHABILITACIÓN Y TELEMEDICINA PARA PACIENTES EPOC CON HIPERINSUFLACIÓN PULMONAR

**De-Leste-Conde, Chantal; Domínguez-Morales, Manuel\*; Rivas-Pérez, Manuel;  
Linares-Barranco, Alejandro**

Grupo de Robótica y Tecnología de Computadores.  
Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Escuela  
Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

\*E-mail: [mjdominguez@us.es](mailto:mjdominguez@us.es)

## RESUMEN

La enfermedad pulmonar obstructiva crónica es la cuarta causa de muerte en el mundo. Gran parte de estos enfermos no están diagnosticados y a medida que avanza la enfermedad empiezan a aparecer dificultades en la respiración y cambios en la fisiología pulmonar. Entre estos cambios está la hiperinsuflación, los pacientes hiperinsuflados retienen aire en los pulmones. Por lo tanto, estos pacientes requieren de un seguimiento y necesitan hacer ejercicios específicos con dispositivos PEP (Presión Espiratoria Postiva) para expulsar este aire. En este proyecto se implementa un sistema que comprenda la función de espirometría y la función de telerehabilitación. Para esto se desarrolla por un lado una aplicación móvil que será la interfaz gráfica y el motor de cálculo, por otro se diseña un espirómetro de turbina que mediante bluetooth envía la velocidad del aire exhalado a la aplicación, y por último dos boquillas intercambiables, una para las pruebas de espirometría y otra que será la boquilla PEP para ejercicios de rehabilitación. Para la boquilla PEP, la cual integra la misma turbina para poder contar revoluciones, se diseñará un juego que mediante estimulación visual avisará al paciente de cuando espira demasiado fuerte o demasiado lento, ayudando así a que los ejercicios se hagan correctamente. Para la boquilla de espirometría, se calcularán la FVC, la FEV1, el Índice de Tiffenau y la curva flujo volumen y se almacenarán los resultados para verlos gráficamente en función del tiempo. Con este proyecto, se pretende dar facilidades y solución a las personas que padecen esta patología, cuyas necesidades requieren de ayuda externa de centros médicos para realizar el seguimiento de su enfermedad y llevar a cabo la rehabilitación, de este modo, se ofrece la posibilidad de hacerlo desde casa y con un control equitativo al que podría dar el servicio técnico de un centro médico.

## PALABRAS CLAVE

EPOC, Telemedicina, Salud, PEP, Telerehabilitación.

## ABSTRACT

Chronic obstructive pulmonary disease is the fourth leading cause of death in the world. Many of these patients are not diagnosed and as the disease progresses, breathing difficulties and changes in pulmonary physiology begin to appear. Among these changes is hyperinflation, hyperinflation patients retain air in the lungs. Therefore, these patients require follow-up and need to do specific exercises with PEP (Positive Expiratory Pressure) devices to expel this air. In this project we want to implement a system that includes the function of spirometry (calculation of lung function) and telerehabilitation function. For this reason, it is developed on the one hand a mobile application that will be the graphical interface and computer brain, on the other hand is designed a turbine spirometer that by bluetooth sends the velocity of the exhaled air to the application, and finally two replaceable nozzles, one for spirometry tests and another that will be the PEP nozzle for rehabilitation exercises. For the PEP nozzle, which integrates the same turbine to be able to count revolutions, a game will be designed that, through visual stimulation, will alert the patient when exhales too hard or too slow, thus helping the exercises to be performed correctly. For the spirometry nozzle, the FVC, FEV1, Tiffenau Index and volume flow curve will be calculated, and the results stored for graphing as a function of time. With this project, it is intended to provide facilities and solutions to people suffering from this pathology, whose needs require external help from medical centers to follow up their disease and carry out rehabilitation, thereby offering the possibility of do it from home and with equitable control that could give the technical service of a medical center.

## KEYWORDS

EPOC, e-Health, Rehabilitation, PEP.

## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

El interés hacia la enfermedad obstructiva pulmonar crónica, EPOC, se debe al reconocimiento de la importancia de la EPOC como causa de morbilidad, invalidez y mortalidad a nivel mundial. En el año 2014 (último año que se dispone de datos) se produjeron en España 395.830 defunciones, de las cuales 43.841 fueron a causa de enfermedades del sistema respiratorio, siendo esta la tercera causa de muerte en España.

La principal causa de la aparición de la EPOC es el tabaquismo y la inhalación de partículas. Además de factores de riesgo como las complicaciones perinatales y enfermedades de la infancia, factores genéticos como el déficit de  $\alpha$ 1-antitripsina y la hiperreactividad de la vía aérea (por alérgenos y por infecciones broncopulmonares repetidas). La espirometría es la principal prueba de la función pulmonar, y es imprescindible para el seguimiento de enfermedades respiratorias como EPOC.

La EPOC es una enfermedad obstructiva, donde se tienen las vías respiratorias inflamadas y obstruidas por gases nocivos, mayormente el tabaco. La EPOC, produce dos cambios patológicos importantes, la obstrucción de las vías aéreas y la pérdida de la retracción elástica del pulmón. Normalmente, el parénquima pulmonar tracciona de las vías aéreas para mantenerlas abiertas, y esta pérdida de la retracción elástica como el incremento de la resistencia de las vías aéreas contribuyen a disminuir el flujo espiratorio, puesto que el flujo a través de las pequeñas vías aéreas es inversamente proporcional a su resistencia y directamente proporcional al gradiente de presiones. Debido a estos dos cambios, durante un ciclo respiratorio normal, los alveolos tienen dificultad para vaciarse durante la fase espiratoria, con lo que son incapaces de retornar a la situación previa a la inspiración. Esto produce un trastorno conocido como atrapamiento aéreo y que ocurre en todos los pacientes con EPOC, independientemente de su gravedad. La consecuencia más inmediata del atrapamiento aéreo en la EPOC es el desarrollo de hiperinsuflación. La hiperinsuflación dinámica HD, es una consecuencia del atrapamiento, el volumen pulmonar al final de la espiración, EELV, no se sitúa en el punto pasivo de relajación de la caja torácica y de los pulmones, sino que se establece a una presión positiva al final de la espiración, auto-PEEP, antes de que la espiración pueda llegar al volumen de relajación, Vr.

Lo que se pretende diseñar en el presente proyecto es un sistema software-hardware con aplicación en telerehabilitación y telemedicina para pacientes con EPOC que por consecuencia están hiperinsuflados.

Para hacer realidad este objetivo se creará una aplicación en iOS, parte software del proyecto, que está compuesta de una sección para realizar pruebas de espirometría forzada, donde se podrán almacenar los resultados y enviarlos al profesional que realice el seguimiento del paciente. Otra sección que albergará un ejercicio de telerehabilitación para pacientes hiperinsuflados, y la sección de registro de los datos.

Además, se desarrollará un dispositivo compuesto por una base y dos boquillas sustituibles (boquilla para espirometría y boquilla PEP) para intercambiarlas en función de lo que el usuario vaya a realizar. El dispositivo estará compuesto por sensores y un microcontrolador, informará a la aplicación en tiempo real de la velocidad al que el paciente espira por la boquilla, esto permite crear juegos interactivos y realizar pruebas de espirometría en cualquier lugar.

## **METODOLOGÍA**

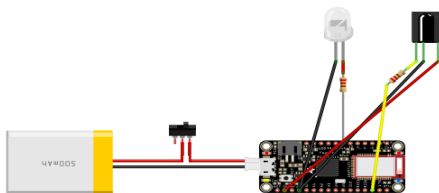
El principio de funcionamiento del espirómetro de turbina es que la velocidad de giro de la hélice es proporcional al flujo; por tanto, a más flujo, más veces se interrumpirá el haz de luz. Esto crea interrupciones en el microcontrolador, es decir vamos a obtener un tren de pulsos. Este tren de pulsos nos da la frecuencia a la que gira la turbina por lo que podemos calcular las revoluciones por minuto para luego calcular el flujo y el volumen.

A la hora de elegir un tipo de espirómetro se han estudiado los diferentes tipos de espirómetros que hay actualmente y se ha decidido en función de las características que más se adecuan a nuestros requisitos. Existen varios tipos de espirómetros, pero se clasifican en dos grupos:

- Espirómetros de Volumen: registran la cantidad de aire exhalado o inhalado en un determinado intervalo de tiempo.
- Espirómetros de flujo: miden que tan rápido fluye el aire cuando se desplaza hacia adentro o hacia afuera del pulmón, conforme se incrementa el volumen de gas inhalado o exhalado.

Dentro de los espirómetros de volumen tenemos el de campana o de agua, de pistón y de fuelle, dentro de los espirómetros de flujo tenemos los neumotacógrafos de tipo fleisch, lilly y desechable, espirómetros de hilo caliente, de ultrasonidos y el espirómetro de turbina. Tras haber estudiado todos estos, se eligió el de turbina porque es entre los que hay el de más fácil implementación, menor coste y más económica reparación.

En la figura siguiente se muestra el esquema de conexiones del prototipo en el PC. El esquema incluye todos los componentes y adaptaciones con el pinout correspondiente de la placa.



**Figura 1.** Conexionado del sistema.

El circuito de adquisición de la señal se compone de dos diodos, un emisor de infrarrojos y un receptor. En el caso del receptor o fotodiodo, se polariza inversamente. Para que el microcontrolador detecte el cambio en ese pin de entrada, se va a conectar el colector del fotodiodo al pin de interrupciones externas. Una vez que tengamos configurada la interrupción, podremos calcular las revoluciones por minuto. Para calcularlas se utiliza la siguiente fórmula:

$$rpm = \frac{n^{\circ} \text{ de pulsos}}{n^{\circ} \text{ de aspas}} * \frac{1 \text{ minuto}}{\text{tiempo entre cada lectura}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

El flujo es la cantidad de aire en volumen V expirado en un tiempo determinado. Para calcular el flujo a través de las revoluciones por minuto primero debemos calcular la velocidad angular:

$$\omega = rpm * \frac{2\pi}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ m.}}{60 \text{ s.}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Luego obtenemos la velocidad lineal multiplicando por el radio:

$$v = \omega * r \quad \text{Ecuación 3}$$

El flujo lo obtenemos por la ecuación de continuidad, donde S es la sección de la turbina:

$$\dot{V} = S * v \quad \text{Ecuación 4}$$

$$S = \pi * r^2 \quad \text{Ecuación 5}$$

El volumen V es la integral del flujo en tiempo:

$$V = \int \dot{V} dt \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: V = Volumen (L), = Flujo (L/s), n° de aspas = 2, Tiempo entre cada lectura: 0.2 segundos.

La aplicación se va a dividir en cuatro secciones de acuerdo con las cuatro diferentes funciones que va a tener:

- Sección de espirometría: El paciente al entrar en esta sección leerá las instrucciones de la prueba, tendrá que poner la boquilla para los tests, luego realizará la prueba 3 veces seguidas tomándose el tiempo que necesite entre una y otra. La aplicación rechazará las pruebas no válidas. Por último, la aplicación calculará en base a los 3 resultados la prueba válida y presentará los resultados en pantalla y mediante una gráfica, luego el usuario podrá enviar dicha gráfica a su médico y guardar los datos si lo cree necesario.
- Sección de ejercicios: El paciente deberá sustituir la boquilla por la boquilla PEP y realizará los ejercicios mediante un juego guiado, deberá mantener una nave espacial entre dos paredes de pinchos que en caso de que toque, la aplicación emitirá un sonido. De esta forma el paciente podrá saber si está realizando el ejercicio correctamente.
- Sección de resultados: En esta sección el usuario podrá ver gráficamente los resultados de sus pruebas. Su fev1 por día, semana, mes o año. Así verá su avance a lo largo del tiempo.
- Sección Bluetooth: Escanea los dispositivos conectados y se conecta automáticamente a nuestro dispositivo si lo encuentra.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la descripción del sistema; a continuación, se presenta el diseño final del dispositivo hardware.



**Figura 2.** Diseño del prototipo.

Una vez terminada la etapa de impresión, se integraron y soldaron todos los componentes del sistema, y se procedió a la etapa de pruebas. En esta etapa se realizaron pruebas al dispositivo y a la aplicación, en la siguiente figura se puede ver el resultado de realizar una prueba de espirometría (sección de tests) con la aplicación diseñada.

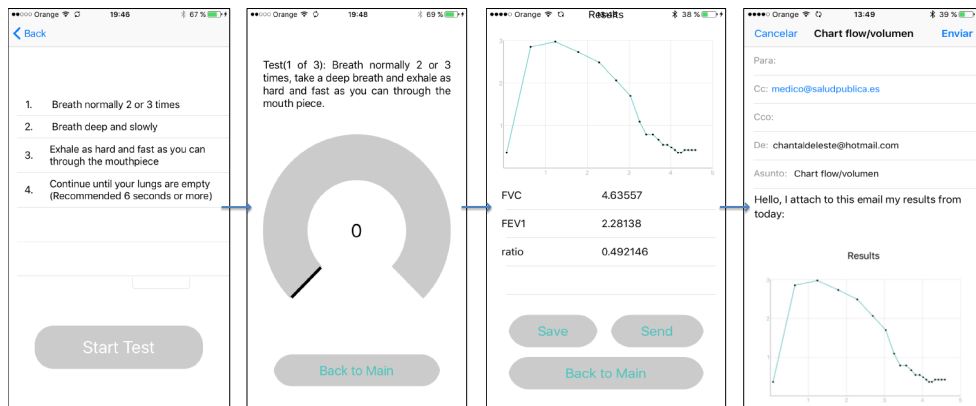


Figura 3. Espirómetro.

La sección de entrenamiento está formada por un juego de móvil en el cual se debe mantener la nave dentro de los límites de la escena sin chocar con los laterales; esto se realiza mediante la espiración del paciente. Como se puede observar en la figura siguiente, la nave se mantiene flotando si el usuario exhala el aire de manera pausada, es decir las revoluciones son las deseadas, si aumenta demasiado se chocará con los pinchos de la parte superior y su exhala muy flojo se chocará con los de abajo, emitiendo un pitido que el usuario escuchará para poder corregir a tiempo.

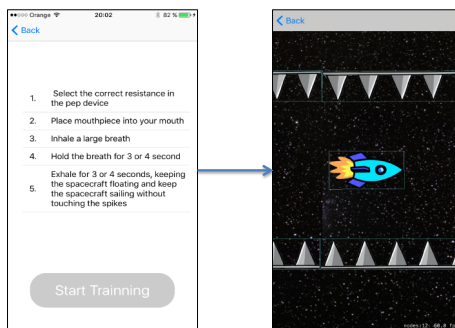


Figura 4. PEP.

Y por último tenemos la sección de resultados. Aquí podremos ver los resultados de las pruebas en gráficas (por horas, semana, mes y año) y sólo tendremos que pulsarlos para generar la gráfica deseada. La gráfica nos mostrara los valores de fev1 que hemos ido registrando. Este valor figura como un índice altamente representativo de la capacidad ventilatoria y es el indicativo habitual de obstrucción de flujo aéreo.



**Figura 5.** Resultados.

Finalmente, se compararon los resultados del prototipo con los resultados un equipo comercial de espirometría, VITALOGRAPH modelo ALPHA Touch en 5 pacientes y así poder medir el error. Los resultados obtenidos están en las siguientes tablas, se puede observar un error bajo y por lo tanto una buena precisión y exactitud de los resultados.

**Tabla 1.** Pruebas FVC.

	Sexo	Edad (años)	Altura (m)	FVC comercial (L)	FVC prototipo (L)	Error (%)
<b>Persona 1</b>	F	24	1.66	5.15	5.00	2.91
<b>Persona 2</b>	M	22	1.70	4.71	4.63	1.69
<b>Persona 3</b>	M	19	1.77	4.51	4.73	4.87
<b>Persona 4</b>	F	25	1.72	4.10	4.21	2.68
<b>Persona 5</b>	M	27	1.82	5.33	5.54	3.93

**Tabla 2.** Pruebas FEV1.

	Sexo	Edad (años)	Altura (m)	FEV1 comercial (L)	FEV1 prototipo (L)	Exactitud (%)
<b>Persona 1</b>	F	24	1.66	3.56	3.8	6.31
<b>Persona 2</b>	M	22	1.70	3.88	3.70	4.64
<b>Persona 3</b>	M	19	1.77	3.71	3.82	2.87
<b>Persona 4</b>	F	25	1.72	3.64	3.72	2.19
<b>Persona 5</b>	M	27	1.82	4.10	4.29	4.63

## CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un espirómetro portátil con transmisión de datos inalámbricos. Permite calcular las variables FEV1, FVC, el índice de Tiffenau, y dibujar la curva flujo volumen. Se ha implementado una aplicación para iOS tanto para la espirometría como para los ejercicios con la boquilla pep. Ha resultado muy útil el uso de un espirómetro de turbina, por su simpleza, por su económico precio en componentes y por la facilidad de limpiar la boquilla. Se diseñó un juego amigable para el usuario para realizar correctamente sus ejercicios con la boquilla pep. Se



han asegurado el registro de los resultados del paciente mediante un apartado en la aplicación que accede a resultados anteriores y los muestra tanto gráfica como numéricamente.

Se ha demostrado que el dispositivo con las aplicaciones desarrolladas posee unos resultados más que aceptables comparados con dispositivos comerciales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado y financiado dentro del grupo de investigación TEP-108: Robótica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Sevilla.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Banner, M., *et al.* (2011). *Effects of expiratory flow resistance on inspiratory work of breathing.*
- [2] Padkao, T., *et al.* (2010). Conical-PEP is safe, reduces lung hyperinflation and contributes to improved exercise endurance in patients with COPD: a randomised cross-over trial. *Journal of Physiotherapy*, 56, pp. 33-39.
- [3] Monteiro, M., *et al.* (2012). Effects of Expiratory Positive Airway Pressure on Dynamic Hyperinflation During Exercise in Patients With COPD. *Respiratory Care*, 57(9), pp. 1405–1412.
- [4] Peces-Barba, G. (2005). Fisiopatología del atrapamiento aéreo en la EPOC. *Patol Respir*, 8 (supl. 2), pp. 255-261.
- [5] García-Río, F. (2005). Importancia del atrapamiento aéreo en la EPOC. *Archivos de Bronconeumología*, 41 (supl 3), pp. 18.
- [6] O'Donnell, D., *et al.* (2015). Lung hyperinflation in COPD: applying physiology to clinical practice. *COPD Research and Practice*, 1(4).
- [7] Russo, D., *et al.* (2016). ¿Cuál es el nivel óptimo de presión espiratoria positiva (PEP) capaz de mejorar la tolerancia a la deambulación de los pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) grave? *Archivos de Bronconeumología*, 52(7), pp. 354–360.
- [8] González-Nieto, V., *et al.* (2005). Rehabilitación respiratoria: aproximación a la situación en España. *Rehabilitación (Madrid)*, 39(3), pp. 128-33.
- [9] Trigo, M. (2003). Principales parámetros de función pulmonar en la enfermedad pulmonar obstructiva crónica. *Atención Primaria*, 32(3), pp. 169-76

- [10] García Río, F. (2007). Evaluación funcional respiratoria (obstrucción y *atrapamiento*). *Archivos de Bronconeumología*, 43 (supl 3), pp. 8-14.