

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EMULACIÓN DE RESPIRACIÓN PARA MANIQUÍES TÉRMICOS PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN

BERLANGA CAÑETE, FÉLIX A. ⁽¹⁾; RUIZ DE ADANA SANTIAGO, MANUEL ⁽¹⁾
OLMEDO, INÉS ⁽¹⁾;
felix.berlanga@uco.es

⁽¹⁾Universidad de Córdoba, Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada

RESUMEN

La respiración de personas en locales influye en las cargas internas sensible y latente, y puede generar problemas de transmisión de contaminantes por vía aérea [1]–[3].

La realización de ensayos experimentales en condiciones controladas permite estudiar con detalle la influencia existente entre el sistema de difusión de aire y la transmisión de contaminantes.

En este trabajo se presenta el diseño y construcción un sistema de emulación de respiración para su implementación en maniqués térmicos con el objetivo de poder realizar ensayos experimentales en condiciones controladas de distintos sistemas de difusión de aire y sistemas de climatización en el Laboratorio de Ventilación y Climatización de la Universidad de Córdoba.

El sistema de emulación de respiración consta de un subsistema mecánico, para desplazar el flujo de aire necesario, un subsistema térmico, para adecuar la temperatura del aire, un subsistema de dosificación de CO₂, para obtener la concentración requerida y un subsistema de control que permite la integración de estos subsistemas para reproducir con precisión las características inherentes a las condiciones respiratorias requeridas.

El sistema de emulación de respiración se ha diseñado para conseguir reproducir un gran número de funciones respiratorias [4], en función del grado de actividad de la persona, su peso, altura, y sexo. El sistema se ha integrado con éxito en maniqués térmicos para la realización de estudios de transmisión de contaminantes por vía aérea en el Laboratorio de Ventilación y Climatización de la Universidad de Córdoba.

Palabras clave: cargas térmicas, respiración.

1. Introducción

Para poder realizar un estudio pormenorizado de climatización en ambientes ocupados por personas, es preciso que, entre las cargas totales del mismo, se contemplen las cargas térmicas originadas por los ocupantes del mismo. Un ser humano situado en una estancia genera una carga térmica sensible y latente que ha de ser compensada por los sistemas de climatización y ventilación existentes. Dichas cargas provienen de la piel y la respiración de dicha persona [5].

En este documento se pretende simular las cargas térmicas emitidas por una persona a través de la respiración. En el proceso respiratorio, la carga sensible emitida se produce por la diferencia de temperaturas entre la masa de aire inspirado y el espirado por la persona. La carga latente se origina por la evaporación de cierto volumen de agua, emitida en la masa de aire exhalado.

Los medios utilizados en el presente estudio para simular la carga térmica de una respiración, permiten solo la emisión de calor sensible. Para compensar la ausencia de calor latente, se modifica la cuantía del calor sensible emitido. Para ello se utilizan compensaciones desarrolladas en otros trabajos de investigación[6]

Publicaciones recientes sobre confort térmico [5],[7]cuantifican la carga térmica originada por un individuo desglosada entre sus diversos orígenes, entre los que se encuentra la producida por la respiración.

2. Objetivos

Se pretende reproducirla carga térmica sensible generada a través de la respiración humana de la manera más realista posible. Para ello se diseña y desarrolla un sistema que permite reproducir los el caudal, la temperatura y la concentración de CO_2 del aire de respiración.

El sistema respiratorio permite reproducir distintas funciones respiratorias, en función del tipo de persona, peso, altura y grado de actividad, y se integra en los maniqués térmicos existentes en el laboratorio de ventilación y climatización de la Universidad de Córdoba[8].

3. Métodos de trabajo

En la Figura 1 se puede observar un diagrama del sistema de simulación construido para satisfacer los objetivos planteados. Este sistema permite el control del flujo de aire inspirado y espirado así como la temperatura del aire durante la espiración.

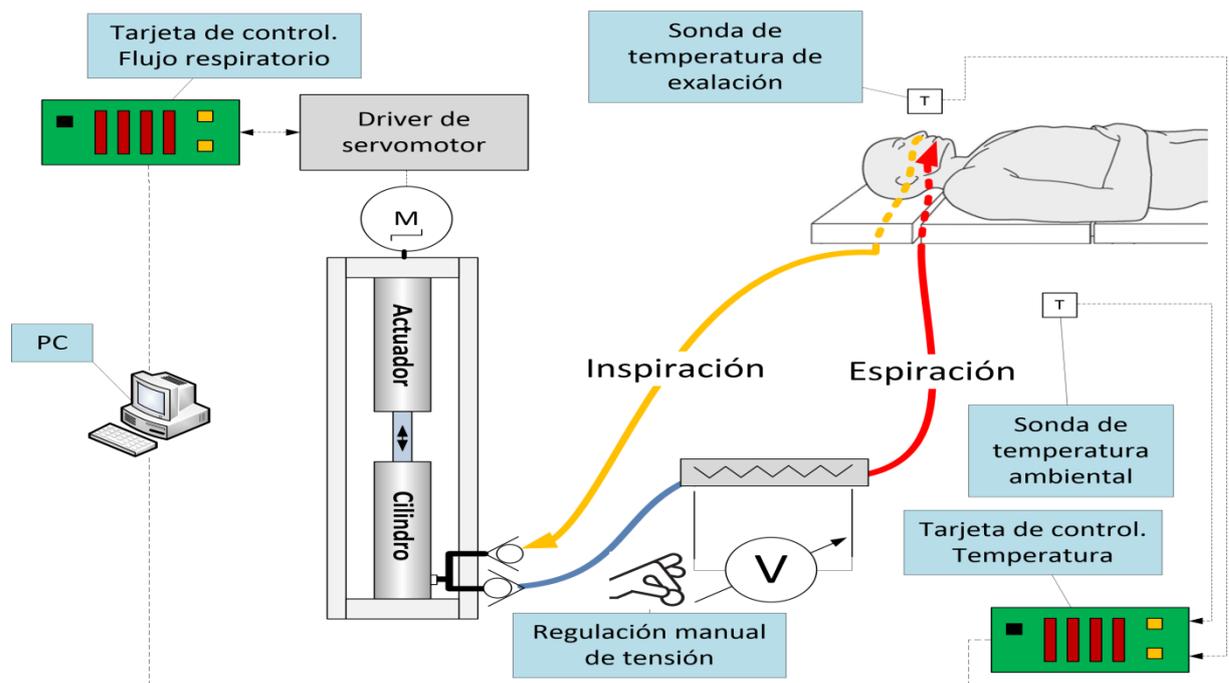


Figura 1. Esquema del sistema de emulación de respiración para maniqués térmicos.

Obtención del flujo respiratorio a reproducir y la temperatura de emisión del aire

La carga térmica del aire respirado que una persona evacúa al ambiente en forma de carga sensible (C_{res}) y latente (E_{res}), depende de la temperatura seca, la humedad relativa del aire ambiente y de la actividad metabólica del individuo [5]:

$$C_{res} = 0.0014M(34 - t_a)$$

$$E_{res} = 0.0173M(5,87 - p_v)$$

Siendo M la tasa metabólica del individuo (W/m^2), t_a la temperatura ambiental ($^{\circ}C$) y p_v la presión de vapor de agua ambiental (kPa).

Para evitar la variación de la potencia latente con la humedad ambiental, se fija un valor de presión parcial de vapor de 1,5 kPa, correspondiente a unas condiciones típicas de ensayo de climatización en ambientes interiores ($24^{\circ}C$ y 50% HR). Esta hipótesis ha sido empleada en trabajos anteriores [6].

El aire se espira a una temperatura (t_{ex}) dependiente de la temperatura seca (t_a) y humedad relativa (HR) ambientales.

$$t_{ex} = 32.6 + 0.066 \cdot t_a + 32 \cdot HR$$

Al carecer de los medios necesarios para emitir calor latente, se va a compensar su ausencia a través de la corrección de los valores sensibles. Se considera como en el caso anterior una humedad relativa ambiental del 50 % para los cálculos de temperatura del flujo espirado.

La carga térmica se produce de manera cíclica asociada a los flujos respiratorios de la persona. El flujo de aire inspirado y espirado no es estacionario. Para modelar dicho flujo se consideran aproximaciones desarrolladas a partir de estudios experimentales sobre la respiración en diferentes tipos de persona [4]. Se concluye que el flujo respiratorio es dependiente de un número concreto de parámetros de la persona, género, peso, altura y actividad metabólica. Cada fase de la respiración, espiración e inspiración, se puede ajustar a través de una función senoidal de la forma:

$$Flow\ rate = a \cdot \sin(\beta t)$$

En función de si nos encontramos en una inspiración o una espiración los parámetros a y β varían. Esta variación se traduce en que, tanto la duración como el flujo máximo de cada fase respiratoria, son diferentes.

Control del flujo respiratorio

El flujo de aire respirado se genera en un cilindro neumático. Durante la inspiración el émbolo del cilindro se mueve en una dirección introduciendo aire en la cámara del cilindro, mientras que, en la espiración, el émbolo se mueve en sentido contrario, evacuando el aire introducido previamente.

El aire recorre dos conductos diferentes durante la inspiración y la espiración. Para asegurar que en cada fase de la respiración el aire circula por el conducto adecuado, se han instalado sendas válvulas antirretorno en cada uno de los conductos.

El movimiento del émbolo del cilindro es solidario al de un actuador lineal. El actuador posee un sistema electrónico de control al que se le pueden programar diferentes movimientos. Los parámetros configurables para cada movimiento son posición final alcanzada, aceleración, velocidad máxima y deceleración del actuador.

Se utiliza una tarjeta de control para indicar, a través de un puerto de comunicación paralelo, el movimiento que ha de ejecutar el actuador de entre los programados en su sistema de control.

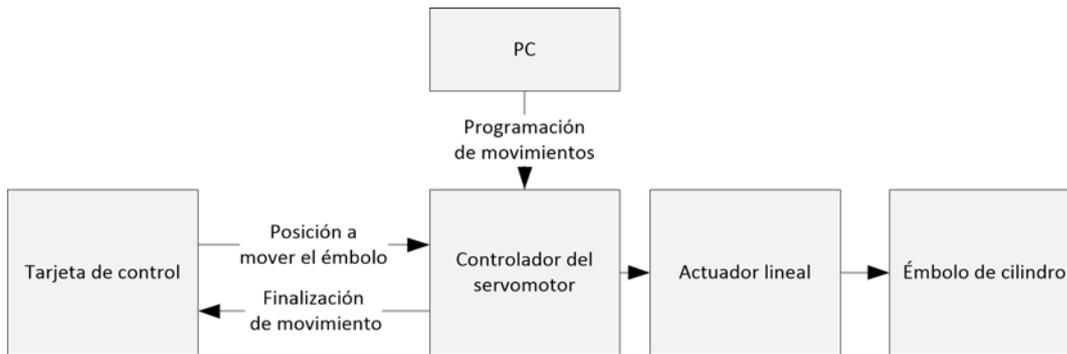


Figura 2. Esquema del proceso de control del flujo de aire emitido.

Se programan dos movimientos en el controlador del servomotor, uno para ejecutar la inspiración y otro para la espiración. El primero parte de la posición con la cámara del cilindro vacía, fin de la espiración, y mueve el pistón hasta el punto en el que el volumen de aire almacenado en el cilindro coincide con el volumen máximo inspirado, conocido como volumen tidal (TV). Se ajustan los valores de aceleración, deceleración y velocidad máxima del émbolo durante cada movimiento para que, tanto en la inspiración como en la espiración el flujo evacuado se ajuste a lo calculado analíticamente. En la Figura 3 se puede observar un ciclo completo de movimiento de pistón, se enfrentan las posiciones teóricamente desarrolladas frente a las obtenidas finalmente.

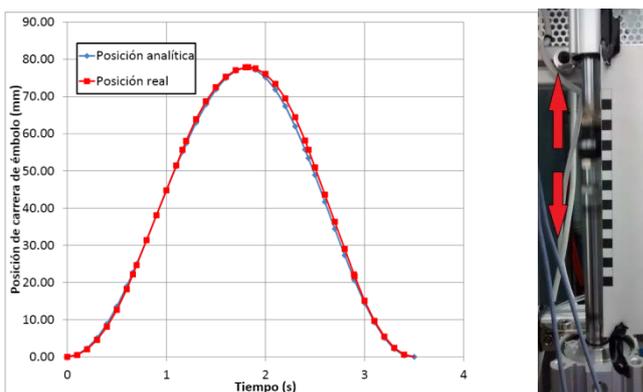


Figura 3. Posiciones analíticas y registradas por el émbolo dentro del cilindro.

Control del flujo de calor

El calor a transmitir al aire espirado se genera a través del efecto Joule. Para ello se utiliza una resistencia instalada en el conducto que lleva el aire del sistema de simulación de la respiración al punto de emisión, ya en el cuerpo del maniquí.

La potencia térmica emitida se controla a través de un variador de tensión conectado a la resistencia instalada. El calor emitido por la resistencia será directamente proporcional a la tensión existente entre sus extremos. El variador se regula manualmente utilizando la temperatura del aire en el punto de emisión para retroalimentar el ajuste.

Para evitar que el flujo se perturbe en el punto de inserción de la resistencia se ha aumentado el diámetro del conducto y se han situado las resistencias sobre la superficie del mismo. Para evitar la pérdida de calor a través de las paredes del tubo, se ha aislado en todos los puntos en los que se ha detectado una posible pérdida de calor al ambiente.

Para hacer más sencillo el proceso de ajuste manual del regulador de tensión, se ha generado un programa de PC con una interfaz gráfica y un sistema de adquisición de temperaturas. El sistema de adquisición de temperaturas utiliza dos sondas PT100 para recoger tanto la temperatura ambiental como la del aire espirado. El programa utiliza el valor de la temperatura ambiental para calcular la temperatura a la que se ha de emitir el aire en la espiración. En una ventana de la interfaz gráfica del programa, se muestran, en tiempo real y de manera continua, el valor de temperatura de espiración calculado junto con la banda admisible en la que se puede

encontrar dicha temperatura sin incurrir en un error excesivo. Al tiempo, en dicha ventana, se grafica el valor de la temperatura de aire espirado recogida por la sonda situada en el punto de descarga de la respiración al ambiente. Utilizando este sistema es sencillo regular el variador de tensión hasta que la temperatura emitida se encuentre dentro de la banda de admisible mostrada. En la Figura 4 se muestra un diagrama en el que se muestra el proceso secuencial de toma de datos y regulación de la temperatura.

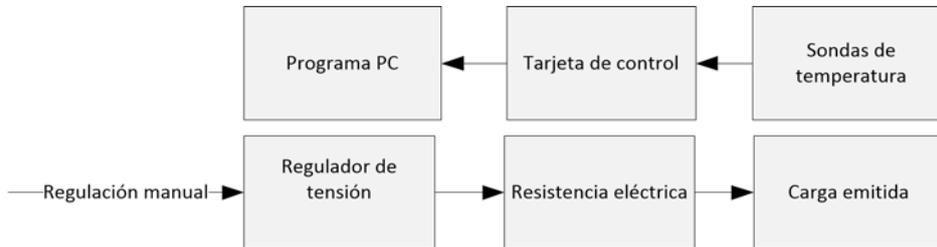


Figura 4. Esquema del proceso de control del flujo de calor emitido.

4. Resultados

Se han llevado a cabo diferentes pruebas para comprobar que el sistema posee la estabilidad y precisión deseadas, contabilizando los errores incurridos tanto en la temperatura como en el flujo de aire espirado.

Para estudiar el grado de desviación del flujo respiratorio simulado respecto al calculado, se ha medido la velocidad del aire en la descarga del conducto de espiración. Se ha utilizado una sonda de velocidad de esfera caliente para llevar a cabo la medida. Las desviaciones temporales máximas registradas entre los ciclos de respiración teóricos y los medidos experimentalmente han sido 0,05 s. Este error supone, considerando un ciclo típico de respiración de 4 segundos, un error inferior al 2 %.

En cuanto a la temperatura del aire emitida, la desviación máxima observada respecto al valor teórico calculado, una vez se ha estabilizado el sistema, es de 0,5 K. Esto supone, considerando una temperatura típica de espiración de 35° C, un error inferior al 1,5%.

Para ilustrar los resultados obtenidos, se muestran medidas de temperatura y velocidad a la descarga del sistema para un caso concreto de respiración simulada. Se ha obtenido el patrón de respiración y cargas térmicas para un hombre de 1,73 m de altura, un peso de 70 kg y una actividad metabólica correspondiente a un estado de reposo.

En la Figura 5 se puede observar una comparativa entre la velocidad teórica esperada y la velocidad real medida. Los valores de velocidad se han representado en forma proporcional, siendo 0 el valor de la velocidad teórica mínima alcanzada y 1 el valor de la velocidad teórica máxima medida.

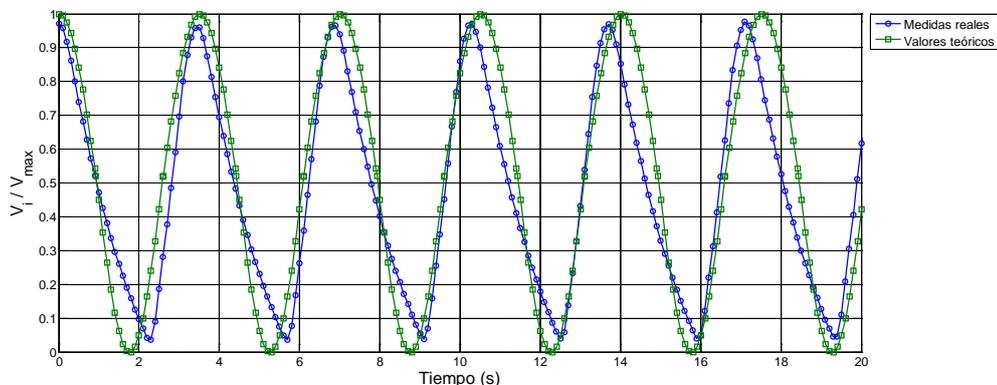


Figura 5. Velocidad teórica calculada frente a la velocidad finalmente registrada.

En la figura 6 se puede observar el registro de la temperatura a la descarga de la respiración del maniquí. Se trata del valor registrado por un sensor de temperatura PT100 instalado en el punto de exhalación de la respiración.

En la figura se muestran tres valores de temperatura calculada y uno medido. El sistema calcula en tiempo real la temperatura que se debe alcanzar en la expiración en función de las condiciones ambientales [5]. Se establecen dos límites, uno de temperatura superior y otro de temperatura inferior admisibles para el ensayo.

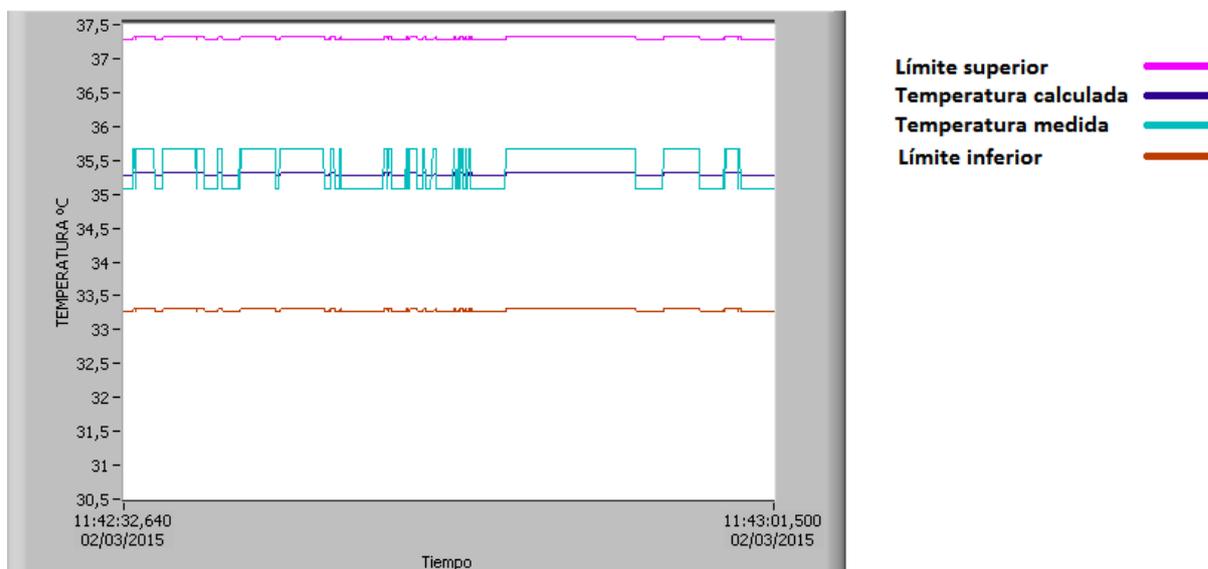


Figura 6. Estabilidad en la temperatura de aire exhalado.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema de respiración artificial que permite emitir la carga térmica sensible originada por la respiración de una persona. Se puede modificar el valor de la carga emitida para simular la respiración de diferentes tipos de persona con diferentes actividades metabólicas.

El sistema se ha diseñado para poder ser integrado en los maniqués térmicos desarrollados por el Laboratorio de Ventilación y Climatización de la Universidad de Córdoba[8]. De esta manera se mejora la capacidad de simulación de la carga térmica emitida por personas.

6. Referencias

- [1] A. Melikov y J. Kaczmarczyk, *Measurement and prediction of indoor air quality using a breathing thermal manikin.*, Revista Indoor Air, 2007, vol. 17, pp. 50-9.
- [2] J. Laverge, M. Spilak, y A. Novoselac, *Experimental assessment of the inhalation zone of standing, sitting and sleeping persons*, Revista Build. Environ., 2014, vol. 82, pp. 258-266.
- [3] C. Xu, P. V Nielsen, G. Gong, L. Liu, y R. L. Jensen, *Measuring the exhaled breath of a manikin and human subjects.*, Revista Indoor Air, 2014, pp. 1-10.
- [4] J. K. Gupta, C.-H. Lin, y Q. Chen, *Characterizing exhaled airflow from breathing and talking.*, Revista Indoor Air, 2010, vol. 20, pp. 31-9.
- [5] ASHRAE, *F09 SI: Thermal Comfort*, ASHRAE Handb. Fundam., pp. 9.1-9.30, 2009.

- [6] S. Tanabe, E. A. Arens, F. Bauman, H. Zang, y T. . Madsen, *Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature*, Revista Ashrae Trans., 1994, vol. 100, pp. 39-47.
- [7] Comité: AEN/CTN 81, *UNE-EN ISO 7730. Ergonomía en ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local*. AENOR, Madrid, 2006, p. 1-60.
- [8] F. A. Berlanga Cañete, M. R. de Adana, e I. Olmedo, "Diseño y construcción de maniqués térmicos para la realización de ensayos experimentales de sistemas de climatización.", En *IX Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica (Cartagena, 3, 4 y 5 de junio de 2015)*, 2015, pp. 1-8.