DOI: 10.21134/e2nxgv09

CYTEF XII Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frio
Universidad Miguel Hernández de Elche
26-06 28-06/2024
UNIVERSITAS Miguel Hernández

ANÁLISIS FLUIDO-DINÁMICO DE UNA VITRINA AUTOSERVICIO

Ricardo Soto[1,2]*, Antonio Rodríguez[2], Miguel Araiz[2], Ibai Elosua[2], David Astrain[2].

1: Unidad de I+D empresarial Global and Local Solutions, Exposición y Conservación de Alimentos S.A., Polígono industrial El Campillo Calle A Nº1 31340, Marcilla, Navarra, España.
e-mail: ricardo.soto@exkalsa.com
2: Departamento de Ingeniería, Instituto de Smart Cities, Universidad Pública de Navarra, Campus de Arrosadia s/n 31006, Pamplona, Navarra, España.

Resumen: *Mantener la comida en condiciones óptimas de conservación es importante para su calidad y seguridad alimentaria. En la última etapa de la cadena de suministro se almacena en muebles refrigerados y congelados en supermercados, cuyo consumo energético es una elevada parte de estos.*

Este estudio aplica la herramienta CFD sobre un mueble horizontal refrigerado abierto. Se emplean boundary conditions sobre los diferentes componentes y secciones del mueble que han permitido obtener un modelo computacional que predice de manera fiable el comportamiento cinético y térmico del mueble. Cumpliendo con el objetivo de entender la distribución de velocidades y temperatura en su interior.

Además, se identifica que la fila de paquetes superior (por su elevada temperatura), la rejilla de impulsión (por su influencia en la cortina de aire) y el conducto de admisión (por las pérdidas de carga), son los puntos desfavorables del mueble, es decir, los más perjudiciales para su eficiencia energética. Nuestro modelo computacional permite, en estos puntos, llevar a cabo en un futuro estudios que obtengan mejoras y contribuir a la reducción del consumo energético de este.

Palabras clave: CFD, mueble refrigerado horizontal abierto, condiciones de contorno, distribución de temperatura.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo energético ha crecido exponencialmente en los últimos 100 años y uno de los sectores que mayor consumo tiene es el de la refrigeración industrial. Dentro de sus aplicaciones se encuentra la refrigeración de alimentos, representando el 30% del consumo energético de la industria alimentaria europea [1] y un consumo energético de 1300 TWh anuales a nivel mundial [2]. Este consumo eléctrico se produce principalmente en los muebles de los supermercado, que funcionan durante las 24h del día, pudiendo llegar a ser el 50% de consumo eléctrico [3].

Por este motivo, el análisis de mejoras sobre la eficiencia energética en estos establecimientos es una de las claves para reducir la demanda eléctrica y las emisiones de contaminantes. Estas mejoras se pueden obtener evaluando nuevas configuraciones en ensayos experimentales. Sin embargo, estos ensayos requieren de tiempo y esfuerzo, por ello, la literatura sobre este tema es escasa. Por contra, la literatura se centra en el desarrollo de modelos computacionales de dinámica de fluidos (CFD) y optimización mediante nuevas configuraciones de mueble verticales, con el objetivo final de disminuir su consumo energético. Históricamente, los supermercados se constituian por muebles verticales abiertos al no interponer barreras físicas entre el producto y el consumidor. Sin embargo, tienían que contrarestar la carga térmica procedente del exterior, que podía ser el 70% de las necesidades energéticas del mueble [4]. Por ello, se han destinado recursos para su optimización mediante CFD. Tal y como muestra Sun et al. [4], emplea un modelo de turbulencia k-ε (como [5], [6], [7]), considerado el más adecuado teniendo en cuenta precisión y coste computacional. En un mueble horizontal la componente principal de aire es diferente, por lo que será necesario comprobar si el modelo de turbulencia es el adecuado.

Dentro de la simulación de las partes del mueble, el ventilador emplea un *fan model* y un salto de presión [4]. Para el evaporador se emplea *un porous material model* y se añade una temperatura de evaporación y un coeficiente de transferencia de calor. Con estas configuraciones, se consigue un modelo válido que posteriormente se emplea para optimizar la cortina de aire. Será interesante comprobar cómo afectan estos ajustes en un mueble horizontal, dado que la cortina de aire es su principal protección frente a las infiltraciones de aire caliente del ambiente. Por otro lado, ante la dificultad de modelar las propiedades variables del aire, se puede optar por modelar el aire como gas ideal [6], [8].

Otro aspecto relevante son las cargas térmicas. En el caso de Hadawey et al. [9], se ha considerado la transferencia de calor por radiación, mediante el modelo *DTRM radiation*. Por otro lado, Wang et al. [6], emplea la condición *heat flux* para la infiltración de aire caliente. Estas cargas térmicas son elevadas en un mueble horizontal, por lo que sería necesario comprobar cuales son los ajustes adecuados.

Finalmente, se ha detectado la inexistencia de modelos CFD para muebles horizontales abiertos. Por ello, se va a desarrollar un modelo que permitirá evaluar la infiltración de aire exterior caliente, que provoca un mayor consumo energético para contrarestarlo.También, permitirá conocer la distribución de velocidades del aire y la temperatura del aire y los paquetes, identificando los puntos críticos que provocan pérdidas de rendimiento.

1.1.Descripción del mueble.

El mueble objeto de estudio (Figura 1) tiene una estructura que permite levantar el compartimento de los alimentos hasta una altura adecuada para el consumidor y una estructura aislante (negro) que minimiza las pérdidas térmicas por conducción.

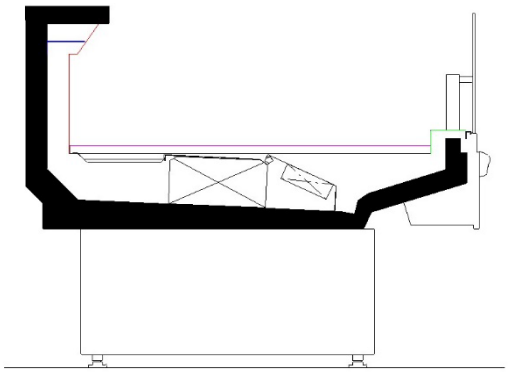

Figura 1: Mueble refrigerado horizontal abierto.

Como se observa, el producto está separado de los conductos de impulsión y admisión del mueble para evitar

posibles obstrucciones. Se coloca el evaporador y el tren de ventilación encima de la estructura aislada y separados del producto mediante de la bandeja de exposición, consiguiendose la recirculación del aire. El aire caliente retorna a través de la rejilla de admisión, mediante el tren de ventilación se acelera el aire y pasa a través del evaporador. El aire continua por el conducto de impulsión y se divide su flujo en dos antes de llegar a la rejilla de impulsión. Al salir el aire, se forma una cortina protectora, contra al aire caliente del ambiente exterior, encima del producto expuesto. Para finalmente retornar a través de la rejilla de admisión al punto inicial comentado.

1.2. Modelo CFD.

El primer paso es decidir el tipo de modelo a realizar. Con el objetivo de reducir la complejidad y el coste computacional de las simulaciones, y dado que el flujo del aire se produce principalmente en dos direcciones, resulta suficiente realizar un estudio 2D [9], [10].
A continuación, se simplifican los elementos de efecto redundante en el modelo. Por ello, se elimina la estructura inferior del mueble, el sujeta-cristal y la caja del ventilador.
A continuación, se divide la geometría en diferentes bloques, con la finalidad de poder asignar diferentes propiedades a cada bloque y diferentes condiciones de contorno (BC) al contacto entre estos. Además, dado que se trata de un mueble abierto y la influencia del ambiente exterior es elevada, es necesario incluir un volumen que lo represente.
El siguiente paso es el mallado de la geometría, de elevada importancia dada su repercusión directa en la precisión y fiabilidad de los resultados que se obtendrán a posteriori. Para ello se establece un Body Sizing en cada bloque de interés: el aire interior, los paquetes, las chapas, los accesorios y el aire exterior. También, para captar la capa límite de turbulencia del aire en el contacto con las paredes, se establece una condición Inflation en todas las zonas que están en contacto con dicho aire.

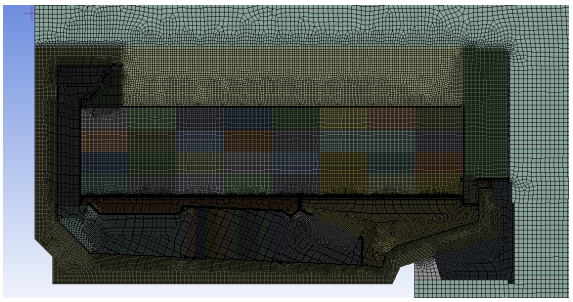

Figura 2: Malla.

Una vez se tiene una malla adecuada para la resolución del problema (Figura **2**), se ataca la configuración del modelo CFD. El modelo de turbulencia escogido es el k-ε realizable por ser el más adecuado a las condiciones del fluido analizado y la función de pared empleada es la “Standard Wall Function”. A continuación, se aplican diferentes condciones de contorno. Para captar la convección del exterior en la carcasa del mueble, se ha aplicado un coeficiente de convección y una temperatura de fluido libre. Por contra, para la generacón de frío en el evaporador, se ha empleado la condición de contorno de tipo “radiator” aplicada a las líneas que lo conforman, un coeficiente de pérdidas de carga y una temperatura de evaporación. Además, el ventilador se ha modelizado con la condición de contorno “fan”, que produce un aumento de presión en una línea y en el caso del modelo 2D, no introduce ninguna rotación en el fluido.
Para la caída de presión en las rejillas, se introduce la caída de presión mediante la condición de contorno de “heat exchanger” con un aporte nulo de calor. Se divide la rejilla de impulsión en tres partes, una parte superior, una inferior y una horizontal. De forma análoga, se establece para la rejilla de admisión un coeficiente de pérdidas de presión.
Para finalizar con las condiciones de contorno e incluir el efecto del flujo de aire exterior y su infiltración en el interior del mueble, se incluyen en el modelo un outlet y un inlet de aire.

1.3. Prototipo experimental.

Con el fin de validar los resultados obtenidos del modelo CFD, es necesario tener un prototipo experimental que suministre los valores a comparar. Para ello, se han realizado ensayos, según la normativa ISO 23953-2, en los que se ha medido la velocidad y temperatura del aire, y la temperatura de los paquetes-M de ensayo

(paquetes de medición que especifica la normativa) con termopares en el centro de estos.

2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han recogido los datos experimentales , trabajando con los valores medios de los ensayos (Figura 3), teniendo en cuenta el periodo de desescarche, tal y como expresa la normativa.

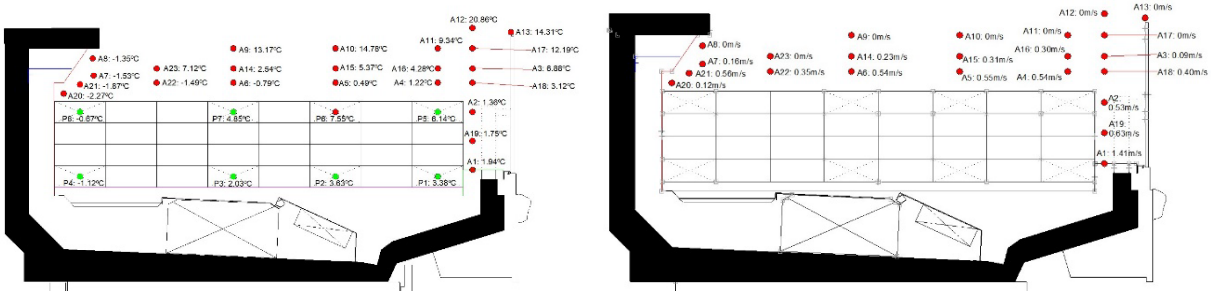

Figura 3: Resultados experimentales. Temperatura del aire y de los paquetes (izquierda). Velocidad del aire (derecha).

El paquete más caliente (P6) se encuentra en la fila superior, donde se tiene una mayor influencia del ambiente exterior. Y el paquete más frío (P4) en la fila inferior, donde se encuentra en contacto con la chapa que divide el canal de impulsión (a temperaturas bajas) y el espacio de exposición, que se enfría por conducción térmica. En el caso del aire, la temperatura de salida en la impulsión es la más baja, y va aumentando a medida que avanzamos por la capa límite del aire sobre los paquetes. También, cabe destacar el gradiente de temperatura entre la capa inferior de la cortina (pegada a los paquetes) y la capa superior (en contacto con el aire ambiente), como a medida que nos despegamos de la capa inferior, la temperatura aumenta, hasta el límite de la temperatura ambiente. Lo mismo ocurre con la admisión, que recoge la parte del aire más caliente de la cortina. En cuanto a la velocidad del aire, se obtiene que tanto en la impulsión como en la admisión se dan las velocidades más altas, debido a la reducción en la sección. También, se puede observar, analizando los datos, que la formación de la cortina de aire horizontal sobre los paquetes es la adecuada, obteniéndose una velocidad de la cortina mayor al inicio que al final, y también, mayor velocidad en la capa inferior, pegada a los paquetes, que en la superior.

3. RESULTADOS DEL MODELO CFD.

Tras la convergencia del modelo, se puede afirmar que el modelo es capaz de simular los aspectos más relevantes del modelo (Figura 4). Capta el cambio de temperatura del aire a su paso por el evaporador, y como va aumentando ligeramente su temperatura una vez sale de este. Se aprecia la infiltración térmica por conducción a través de la estructura y la formación de una capa más caliente pegada a esta. También, se recoge la diferencia de temperatura en la impulsión y como se mantiene a lo largo de la cortina de aire, que se forma pegada a los paquetes y va aumentando su temperatura debido a la infiltración del aire exterior. Asimismo, podemos observar que los paquetes con temperaturas más bajas se encuentran pegados al conducto de impulsión, dado que por ahí circula el aire más frío del mueble. Otro aspecto interesante es que la temperatura de los paquetes sigue la misma tendencia que la cortina de aire.
Igualmente, se modeliza la velocidad del aire. Podemos observar cómo la velocidad del aire disminuye cuando la sección aumenta y aumenta de velocidad cuando la sección disminuye. Además, a medida que la cortina de aire sobre los paquetes avanza, esta pierde fuerza, influenciada por las infiltraciones de aire exterior, y su velocidad disminuye, captándose así su gradiente de velocidades.

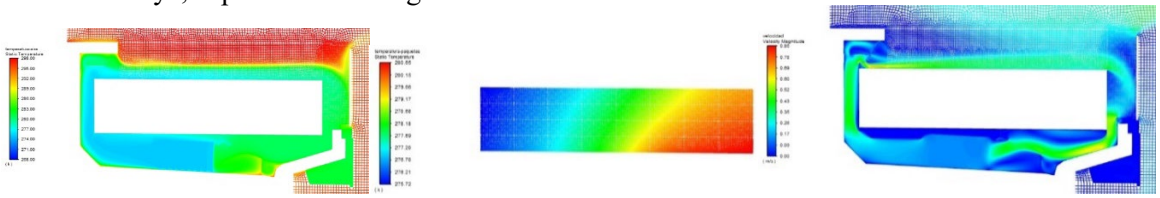

Figura 4: Resultados del modelo: temperatura del aire (izquierda), de los paquetes (centro) y velocidad del aire (derecha).

4. VALIDACIÓN

Con el fin de tener un modelo capaz de representar fidedignamente el comportamiento del mueble, se comparan los resultados obtenidos experimentalmente con los del modelo CFD, conclyendo que el modelo computacional es capaz de captar los efectos más notables e importantes.
Por un lado, la cortina de aire. De especial interés dado que la infiltración de aire caliente procedente del ambiente es la principal carga térmica a compensar por el sistema y el factor que determina la temperatura de los paquetes. En la Figura 5 se obtiene la temperatura de la cortina de aire simulada (con un offset de 3ºC) en función de la altura sobre los paquetes. Se aprecia que, la temperatura crece a medida que nos alejamos de los paquetes, fenómeno que ocurre ambos modeos.

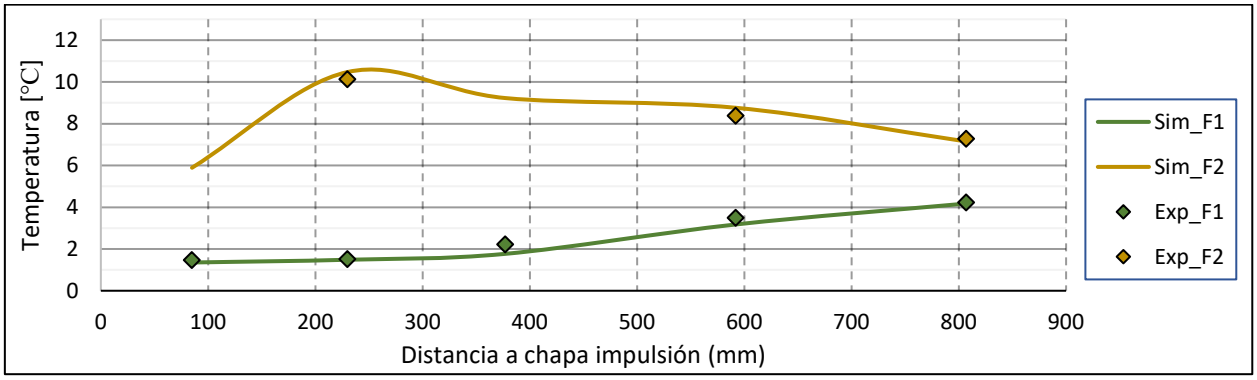

Figura 5: Variabilidad de los valores obtenidos del modelo en función de la posición de la sonda.

También, se capta la división del flujo de aire en la impulsión, que permite crear una cortina de aire horizontal doble. Una exterior de velocidad baja y de flujo laminar, y una interior de velocidad alta y flujo turbulento. Además, se detecta los puntos críticos en los que se producen pérdidas de presión y ralentizan el aire, perjudicando la distribución de temperaturas del mueble. Por ello, podemos afirmar que el modelo recoge con fidelidad la tendencia de la cortina de aire del mueble.
Por otro lado, se capta la distribución de temperaturas en los paquetes, detectando el gradiente de temperatura que se produce de izquierda a derecha, y de abajo a ariba, de menor a mayor temperatura respectivamente en ambos casos. Como se observa en la Figura 3, los paquetes más calientes, y por lo tanto, más desfavorables para el mueble, son los paquetes P5, P6 y P7. En ellos, la desviación entre lo experimental y lo simulado es de $0.42ºC$, $1.85ºC$ y $0.52ºC$, respectivamente. Estos errores son asumibles, dado el elevado rango de temperaturas que se dan en el mueble, concluyendo así, que, el modelo computacional es el adecuado.
Finalmente, tras un proceso de estudio del sistema e implementación del modelo hasta lograr valores de convergencia adecuados, se ha comprobado que el modelo computacional en CFD es capaz de ofrecer resultados posibles, tanto en velocidades como en temperaturas. Podemos concluir que el modelo es capaz de recoger la formación de la cortina de aire sobre los paquetes, en el retorno y en la impulsión, captando también la división del flujo en dicho conducto. Además, es capaz de reproducir la distribución de temperaturas de los paquetes con solvencia.

5. CONCLUSIONES

Tras el análisis bibliográfico se ha comprobado que no existen estudios computacionales que simulen el comportamiento cinético y térmico de muebles horizontales abiertos, por lo que es necesario el desarrollo de una herramienta computacional que permita su estudio.
Se ha implementado un modelo CFD en 2D, que es capaz de simular la distribución de velocidades y temperaturas en la vitrina. Debido a la dificultad intrínseca de este sistema donde las temperaturas cambian constantemente por los periodos de desescarche, se ha optado por unas simulaciones en régimen permanente.
Para validar el modelo computacional ha sido necesario el desarrollo de una metodología experimental en la que se han medido las temperaturas y velocidades de multitud de puntos distribuidos tanto en los paquetes de carga del mueble, como en el aire.
Gracias a este modelo computacional, se obtiene la distribución de la temperatura de los paquetes y la tendencia de la temperatura del aire. Además, se identifica el punto de mayor influencia en el comportamiento del mueble, la impulsión. Lo que permitirá realizar estudios de optimización en un futuro.

REFERENCIAS

[1] S. Duret *et al.*, "Interactions between refrigeration temperatures, energy consumption in a food plant and microbiological quality of the food product: Application to refrigerated stuffed pasta," *Food Control*, vol. 126, p. 108076, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.FOODCONT.2021.108076.

[2] J. A. Evans *et al.*, "Specific energy consumption values for various refrigerated food cold stores," *Energy Build*, vol. 74, pp. 141–151, May 2014, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.11.075.

[3] K. M. Tsamos, H. Mroue, J. Sun, S. A. Tassou, N. Nicholls, and G. Smith, "Energy Savings Potential in Using Cold-shelves Innovation for Multi-deck Open Front Refrigerated Cabinets," *Energy Procedia*, vol. 161, pp. 292–299, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2019.02.094.

[4] J. Sun, K. M. Tsamos, and S. A. Tassou, "CFD comparisons of open-type refrigerated display cabinets with/without air guiding strips," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 54–61. doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.284.

[5] T. Vengalis and V. Mokšin, "2D CFD Simulation of Dynamic Heat Transfer in an Open-Type Refrigerated Display Cabinet," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 14, Jul. 2022, doi: 10.3390/app12146916.

[6] L. Wang, L. Zhang, and G. Lian, "A CFD Simulation of 3D Air Flow and Temperature Variation in Refrigeration Cabinet," *Procedia Eng*, vol. 102, pp. 1599–1611, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.PROENG.2015.01.296.

[7] A. M. Foster, M. Madge, and J. A. Evans, "The use of CFD to improve the performance of a chilled multi-deck retail display cabinet," *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, no. 5, pp. 698–705, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.12.009.

[8] M. N. Nikitin, "Numerical analysis of refrigerated display designs in terms of cooling efficiency," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 148, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106157.

[9] A. Hadawey, T. J. Jaber, A. F. Hadawey, W. A. Ghaffar, and A. H. A. M. Hasan, "Air Curtain Design Optimization of Refrigerated Vertical Display Cabinet using CFD," *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 76–88, 2012, doi: 10.17950/ijset.

[10] P. D'Agaro, G. Cortella, and G. Croce, "Two- and three-dimensional CFD applied to vertical display cabinets simulation," *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 2, pp. 178–190, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.IJREFRIG.2005.06.007.