

Estudio de casos del uso de MegaFan en almacenes: Informe Final

FECHA: 30 DE JUNIO DE 2010

AUTOR: DR. JAMES FORREST Y PROF. IEUAN OWEN

Consideraciones generales

Investigadores del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Liverpool han sido contratados por MegaFan Technologies Ltd (MTL) para modelar el flujo de aire y la transferencia de calor en un edificio con calefacción destinado a almacenamiento con objeto de investigar los niveles de desestratificación ofrecidos por los ventiladores de gran volumen y baja velocidad (HVLS por sus siglas en inglés).

Se utilizó la Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) para elaborar un modelo de un almacén prototípico, que cuenta con un ventilador HVLS y un calentador. Los requisitos de potencia del calentador se han estimado partiendo de una temperatura objetivo al nivel del suelo de 16°C. Este procedimiento se ha aplicado con el ventilador apagado y en funcionamiento. Se han analizado diversas alturas de edificación y temperaturas exteriores con el fin de obtener datos de rendimiento de los ventiladores HVLS en un amplio espectro de condiciones operativas. Para una temperatura exterior de 4°C, el análisis muestra ahorros energéticos en calefacción del orden del 40 al 45% cuando el ventilador HVLS está en funcionamiento.

Alcance

El alcance del presente estudio fue el siguiente:

- Crear un modelo computacional de un almacén prototípico con un área de 30 x 30m y alturas de ápice de 12.5m, 15.0m, 17.5m y 20.0m.
- Aplicar al modelo el componente de deflexión hacia abajo (efecto "downwash") generada por el ventilador y del calentador con el fin de tener en cuenta los efectos de la transferencia de calor, materia y cantidad de movimiento generada por estos.
- Determinar la potencia de calentador necesaria para alcanzar una temperatura a nivel del suelo de 16°C para las distintas alturas de edificación con el ventilador HVLS apagado y en funcionamiento (a una temperatura exterior de 4°C).
- Determinar la potencia de calentador necesaria para alcanzar una temperatura a nivel del suelo de 16°C para una altura de edificación de 17.5m a temperaturas exteriores de -4°C y 0°C.
- Realizar estimaciones del ahorro energético derivado del uso de ventiladores HVLS.

El trabajo aquí expuesto parte de un estudio de viabilidad previo llevado a cabo por los mismos autores (informe de fecha 15 de marzo de 2010), en el que se concluye que los resultados del modelo de estratificación/desestratificación confirman los datos aislados obtenidos de actuales usuarios de ventiladores HVLS.

Antecedentes

La estratificación térmica se da en los edificios con calefacción debido a la flotabilidad natural del aire caliente, que provoca que el aire calentado ascienda y se acumule en el techo. Esto tiene como resultado una falta de homogeneidad térmica marcada por un proceso de estratificación, con aumentos de temperatura que oscilan por lo general entre 0,5°C y 1°C por metro (desde el suelo hasta el techo) en sentido ascendente. La estratificación térmica es más acusada en edificios de techos elevados que se calientan desde arriba, tales como los almacenes, donde este fenómeno provoca un despilfarro energético debido a que la mayor parte del área (por encima de la altura del termostato) se calienta a una temperatura mayor a la temperatura de ajuste del termostato.

Los ventiladores HVLS se sitúan por lo general cerca del techo e inducen una desestratificación térmica al empujar el aire caliente hacia el suelo. Esto genera corrientes de convección y favorece la mezcla del aire caliente con el frío, lo que resulta en una distribución más uniforme de la temperatura y reduce el consumo de energía.

Los datos aislados obtenidos de actuales usuarios de ventiladores HVLS indican que la instalación de ventiladores HVLS conlleva un considerable ahorro energético durante los meses más fríos, lo que se refleja en una reducción en la factura de la calefacción. Pese a que el modo de funcionamiento de estos ventiladores se conoce con razonable precisión, los trabajos de investigación científica llevados a cabo para corroborar estos resultados in situ han sido escasos. Como primer paso hacia una mejor comprensión de los mecanismos físicos implicados, el presente informe aporta información detallada del análisis computacional de fluidos y flujo de calor realizado a partir de un almacén prototípico con un único calentador y un ventilador HVLS.

Metodología de modelización

Geometría y condiciones límite

El modelo se definió de tal modo que sólo se modeló una subárea, única y replicable, del almacén, ilustrada en la Fig. 1. Esta simplificación reduce notablemente el tiempo de ejecución del modelo, dado que modelar un almacén completo con múltiples aparatos de calefacción y ventiladores mediante el hardware computacional actual era impracticable atendiendo a los plazos del proyecto. El diseño de la geometría permite variar la altura del ápice de 12.5m a 20m, con el ventilador situado aproximadamente 1 metro por debajo del ápice. El calentador se situó hacia un lateral del dominio, a una distancia aproximada de 2m del techo. Esta disposición está basada en el diagrama esquemático de un almacén facilitado por MTL.

Las pérdidas que se producen a través del suelo, el techo y las paredes verticales se modelaron asumiendo únicamente la transferencia de calor por convección, en la que el flujo de calor viene determinado por:

$$q = U(T_{ext} - T_w)$$

donde U es el coeficiente de transferencia de calor (valor U), T_{ext} es la temperatura externa (de fuera) y T_w es la temperatura de la pared (calculada por medio del solucionador). Los valores de U para el suelo, las paredes verticales y el techo se ajustaron a 0.5, 0.25 y 0.485 W/m²K, respectivamente.

Las dos paredes verticales más alejadas del calentador se configuraron como planos de simetría, lo que permite reflejar el dominio en torno a los ejes x e y ; esto supuso de facto modelizar una geometría cuatro veces mayor. El resto de laterales se configuraron como paredes conforme a la condición de no deslizamiento.

Método computacional

La modelización del almacén está representada por cerca de 2,8 millones de células computacionales, agrupadas estrechamente en torno a zonas de interés (el ventilador y el aparato de calefacción o calentador). Las ecuaciones de dinámica de fluidos y transferencia de calor se resuelven de modo iterativo en cada célula, garantizándose el cumplimiento de las leyes de conservación de la materia, la cantidad de movimiento y la energía. Al iniciarse la modelización, la velocidad del dominio se ajusta a cero y la temperatura se establece para igualar la temperatura exterior. Esto simula de forma eficaz el calentamiento gradual del almacén. Una vez las iteraciones convergen en una solución estable, los resultados finales vienen dados por los valores de los campos de velocidad, presión y temperatura.

Para los cálculos se utilizó un operador de Navier–Stokes basado en la presión: en los elementos de convección se aplicó la discretización de segundo orden a las corrientes ascendentes y el acoplamiento presión–velocidad se resolvió conforme al método SIMPLEC. A fin de simplificar los cálculos y favorecer la convergencia, se utilizó la aproximación de Boussinesq. Por consiguiente, la densidad del aire se definió como constante en todas las ecuaciones, excepto en la variable de flotabilidad en la ecuación relativa a la cantidad de movimiento. La convergencia hacia el estado estacionario se alcanzó tras cerca de 50.000 iteraciones en todos los casos.

Con el fin de tener en cuenta los efectos de la turbulencia se utilizó el modelo estándar $k-\varepsilon$ aumentado con funciones optimizadas relativas a las paredes y con efectos de flotabilidad. Para garantizar que la modelización reflejase de forma precisa la transferencia de calor por convección resultaba esencial resolver los estratos límite viscosos; por consiguiente, la malla computacional se diseñó para arrojar valores y^+ de entre 1 y 5 y el centro de gravedad de la primera célula se situó dentro del subestrato viscoso.

Modelización de componentes

El calentador está basado en el aparato de calefacción de edificios AmbiRad USDA 100, con una producción de calor máxima de 97 kW y un caudal de aire de 10,360 m³/h. A los efectos del presente estudio, el caudal de aire del calentador se mantuvo constante a un nivel aproximado de 9,000 m³/h y la producción de calor se fue ajustando conforme a las necesidades. El calor se introdujo en el almacén empleando una fuente de energía situada dentro del calentador, el cual es alimentado con aire del entorno por medio de un modelo de ventilador simplificado consistente en un salto instantáneo de presión de 50 Pa (ubicado asimismo dentro del cuerpo del calentador).

El modelo de ventilador HVLS se desarrolló sobre la base de datos aerodinámicos (coeficientes de fuerza ascensional, resistencia aerodinámica y momento de inversión) computarizados a partir de una sección bidimensional de un aspa de ventilador MegaFan utilizando CFD; la Figura 2 muestra la malla estructurada utilizada para calcular los datos aerodinámicos. Se obtuvieron datos relativos a un total de 50 ángulos de incidencia, cuyos coeficientes aerodinámicos resultantes se muestran en la Figura 3. También se incluyen en esta figura los coeficientes correspondientes a una sección aerodinámica NACA 0012, que tiene una forma similar y, en consecuencia, similares características aerodinámicas, lo que aumenta la fiabilidad de los valores asignados a las aspas MegaFan. La Figura 4 ilustra los contornos de las magnitudes de presión y velocidad sobre la sección aerodinámica del MegaFan en un ejemplo extraído de una modelización computacional con un ángulo de incidencia de 8°.

El efecto “downwash” se calculó en base a la teoría de elementos del aspa (“blade-element theory”), en la que cada aspa se divide en subsecciones. El volumen de aire propulsado hacia abajo por cada sección del aspa guarda una relación directa con la fuerza ascensional generada, por lo que la fuerza ascensional en cada sección se calcula a partir de la velocidad del aire en dicha zona. El efecto global sobre el flujo de aire consiste en generar un impulso que empuja el aire hacia el suelo.

El ventilador está basado en un ventilador MaxAir de diez aspas de MegaFan con un diámetro de 7,3m. Para los cálculos, la velocidad de rotación se estableció en aproximadamente 36 RPM, lo que se corresponde con el 55% de la velocidad máxima del ventilador. El ángulo de paso de las aspas se fijó en 7°, tomando como base el ángulo medio cuerda-tangente desde el borde de ataque al borde de salida para la sección aerodinámica en cuestión.

Enfoque de modelización

El enfoque utilizado en el presente estudio consistió en determinar el nivel de potencia al que debía ajustarse el calentador para alcanzar una temperatura media de 16 °C a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo (en ambos casos: con el ventilador HVLS apagado y encendido). Se eligió esta temperatura porque representa una temperatura de trabajo habitual en los almacenes de usuarios actuales de ventiladores HVLS. En adelante nos referiremos a la temperatura media a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo como “temperatura a nivel del suelo”.

Determinar la potencia de calefacción necesaria para cada combinación de altura de ápice, temperatura exterior y estado del ventilador requiere la realización de varios cálculos computacionales para cada una de las combinaciones y los distintos niveles de ajuste de la potencia del calentador. Una vez obtenidos a partir de los datos suficientes puntos para un caso concreto (por lo general entre 4 y 6 puntos), se trazó una curva de adaptación óptima en forma $y = Ax^b + C$ uniendo los puntos con el fin de estimar la temperatura a nivel del suelo como función de la potencia del calentador (véase la Figura 5). A partir de estos datos fue posible derivar la potencia de calefacción requerida para alcanzar una temperatura de 16°C al nivel del suelo.

Tras determinar la diferencia en cuanto a la potencia de calefacción exigida en condiciones de ventilador apagado o en funcionamiento, puede calcularse el ahorro energético ofrecido por el ventilador HVLS tomando como base la reducción de potencia en comparación con el escenario de ventilador apagado. Así, por ejemplo, si consideramos los datos mostrados en la Figura 5, para alcanzar una temperatura de 16°C al nivel del suelo, la potencia de calefacción exigida con el ventilador en funcionamiento es de 13 kW, comparado con 19 kW cuando el ventilador está apagado; un ahorro en potencia de calefacción de cerca del 30%.

Premisas de modelización

Conviene señalar que el presente análisis computacional implica la adopción de diversas premisas de modelización y simplificaciones. Considerar la totalidad de las aportaciones y pérdidas térmicas del edificio, tanto salientes como entrantes, tales como la intensidad solar, la iluminación, las puertas, las filtraciones de aire, etc. no resulta viable ni posible atendiendo a los plazos del proyecto. Así mismo, el almacén se modelizó vacío, sin trasiego, personas, ni muebles.

Para confirmar con mayor fiabilidad los resultados presentados, sería positivo validar el modelo con datos de temperatura y velocidad extraídos de un almacén real, así como comparar los niveles de consumo de energía previstos con los efectivamente registrados. Lamentablemente, no disponemos de tales datos, por lo que los resultados previstos por el modelo deberán interpretarse con cautela. No obstante, los niveles de ahorro energético previstos en los estudios iniciales concuerdan de forma alentadora con los facilitados por usuarios actuales de ventiladores HVLS.

Casos estudiados

Cada test de caso se ejecutó dos veces; una con el ventilador HVLS en funcionamiento y otra con el ventilador apagado. Los casos modelados durante el presente estudio fueron los siguientes:

Comprobación del efecto de la altura del almacén

- Temperatura exterior de 4°C (temperatura media en el Reino Unido durante el invierno conforme a la agencia meteorológica oficial)
- Alturas de ápice de 12,5m; 15m; 17,5m y 20,0m

Comprobación del efecto de la temperatura exterior

- Temperatura exterior de -4°C, 0°C y 4°C
- Altura de ápice de 17,5m

Resultados

En todos los casos en que el ventilador está apagado se constata estratificación térmica; a su vez, la desestratificación térmica es completa en todos los casos analizados con el ventilador en funcionamiento. La Figura 6 muestra los contornos de temperatura en las distintas áreas del almacén e ilustra que, cuando el ventilador está apagado, los niveles de estratificación son similares para las distintas alturas del almacén, situándose entre 0,5°C y 1°C por metro. En todos los escenarios de ventilador en funcionamiento puede observarse una distribución uniforme de la temperatura.

La Figura 7 ilustra los contornos de la magnitud de velocidad en las distintas áreas del almacén, mostrando los efectos del calentador y el ventilador HVLS, que constituyen los principales mecanismos de convección que dirigen el flujo. En ambos casos, con el ventilador en funcionamiento y apagado, puede observarse cómo el aire que fluye desde el calentador asciende ligeramente debido a los efectos de la flotabilidad natural y se desplaza a lo largo del techo hasta llegara la pared opuesta. En la pared, el flujo es empujado en sentido descendente

durante un breve lapso de tiempo, antes de verse retardado por una combinación de pérdidas por disipación y fuerzas de flotabilidad. La diferencia más patente entre los casos con el ventilador apagado y en funcionamiento es la deflexión hacia abajo (efecto “downwash”) generada por el ventilador en los casos en que éste está en funcionamiento, que alcanza velocidades del orden de 2 m/s. Puede observarse en el suelo un flujo de corriente que se extiende; en estos casos el flujo alcanza también las paredes laterales antes de verse empujado en sentido ascendente hacia el techo. El hecho de que el aire se vea también empujado hacia la parte superior del ventilador HVLS ayuda a mantener la circulación del flujo en todo el almacén. La recirculación del flujo se muestra claramente en la Figura 8: las líneas de corriente ilustran el camino tomado por las partículas fluidas tras la deflexión hacia abajo inducida por el ventilador HVLS.

En la Figura 9 se muestra cómo la potencia de calefacción requerida aumenta con el incremento de la altura de ápice. Esto resulta previsible, ya que un techo más elevado implica un mayor volumen de aire que calentar y una mayor superficie de pared en la que se producen pérdidas energéticas. Resulta también evidente que, en los casos en que el ventilador HVLS está en funcionamiento, la potencia de calefacción requerida es significativamente menor. Con el ventilador apagado, buena parte de la energía del calentador se emplea para calentar el aire que permanece cerca del techo a una temperatura muy superior a la requerida al nivel del suelo. Esto supone un despilfarro energético. En cambio, cuando el ventilador está en funcionamiento, el almacén se calienta uniformemente y no se desperdicia energía calorífica calentado la parte superior del recinto.

Resulta interesante observar que los casos en que el ventilador está apagado muestran un comportamiento no lineal en términos de variación de la potencia requerida con la altura de ápice. Puede constatarse un acusado incremento en la potencia requerida entre los 12,5m y los 15,0m; no obstante este incremento es menos acusado en alturas de ápice superiores. Esto se debe a que la estratificación es menos marcada en alturas de techo inferiores debido a la proximidad de los estratos calientes superiores respecto al suelo y a la influencia de la corriente liberada por el calentador, que empuja hacia abajo el aire situado en la pared lateral. Por consiguiente, en alturas de 12,5m se requiere menor potencia de calefacción con el ventilador apagado porque el calentador proporciona una cierta circulación del aire. A medida que aumenta la altura del edificio, la influencia de la corriente procedente del calentador en el área adyacente disminuye.

Los resultados que se recogen en la Figura 9 pueden traducirse en ahorros energéticos, tanto en términos de valores absolutos como en ahorro porcentual, frente a los escenarios que no incluyen ventilador HVLS. Estos últimos se muestran en la Figura 10. Como puede observarse, en los casos en que la temperatura exterior se fija en 4°C, el ahorro energético aumenta hasta un punto situado en una altura de ápice de entre 15,0m y 17,5m, antes de alcanzar una zona de estancamiento. Esto no indica que el ventilador HVLS sea menos efectivo en almacenes de menor altura; sino más bien que la estratificación no es un problema tan severo a tales alturas, como se ha señalado anteriormente. Los resultados del modelo muestran que el ahorro energético porcentual ofrecido por los ventiladores HVLS oscila entre el 40% y el 45% para alturas de ápice de entre 15,0m y 20,0m.

Los datos de las Figuras 9 y 10 ilustran también el efecto de la temperatura exterior en la potencia de calefacción requerida. Esto se observa con mayor claridad en la Figura 11, donde se aprecia un incremento constante de la potencia requerida a medida que disminuye la temperatura exterior, tanto con el ventilador apagado, como con el ventilador en funcionamiento. Pese a que el aumento del ahorro energético a medida que desciende la temperatura exterior es más bien modesto, el ahorro energético en términos absolutos se dobla cuando la temperatura desciende de 4°C a -4°C. Esto implica un ahorro de entre 1 y 1,5 kW por cada descenso de temperatura de un grado a partir de los 4°C. Si bien las curvas de la Figura 11 parecen lineales, este no es el caso, pues ambas curvas deben converger en 0kW de potencia a 16°C. La divergencia de las curvas con el

descenso de la temperatura exterior sugiere que el ahorro energético ofrecido por los ventiladores HVLS continuaría aumentando a medida que desciende la temperatura

Conclusiones

Se ha modelizado el flujo de fluidos y la transferencia de calor en un modelo computacional de un almacén prototípico con el fin de comprobar la eficacia de los ventiladores HVLS. En los casos en que los ventiladores no estaban operativos, se ha constatado un fenómeno natural de estratificación térmica; la capacidad de los ventiladores HVLS para desestratificar el almacén se ha demostrado claramente.

En los casos analizados, el ahorro energético ofrecido por los ventiladores HVLS a una temperatura exterior de 4°C llega al valor máximo entre el 40% y el 45%. Se han constatado ahorros adicionales a medida que se reducía la temperatura exterior. Los resultados muestran que el aprovechamiento óptimo de los ventiladores se produce en edificios de alturas superiores a 15,0m; aunque, incluso para una altura de 12,5m, el ahorro energético ronda el 32%.

El modelo demuestra que el ventilador HVLS es eficaz debido a la transferencia de calor y materia por convección, que implica el desplazamiento de grandes volúmenes de aire desde la parte superior del almacén hacia el suelo. Esto crea corrientes que favorecen también el mezclado del aire, lográndose una desestratificación completa del almacén.

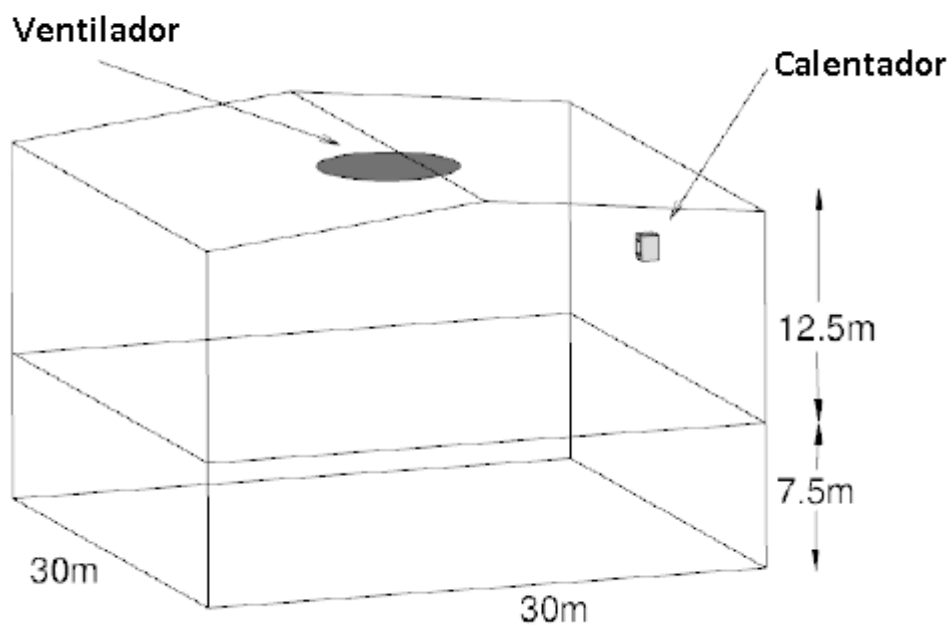


Figura 1: Estructura geométrica del almacén modelo (el ápice del techo puede variar entre 12,5m y 20m sobre el nivel del suelo).

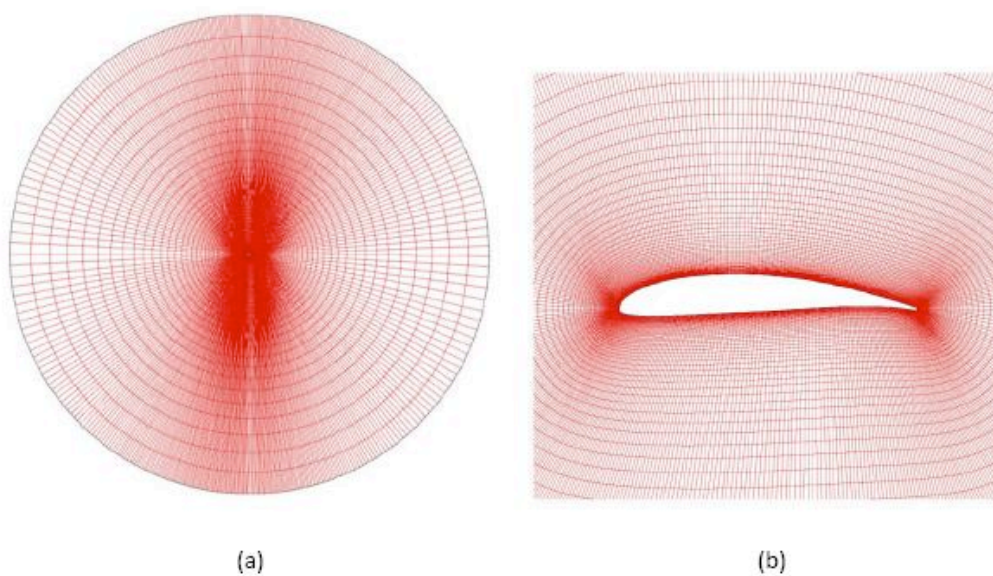


Figura 2: Malla computacional utilizada para calcular las características aerodinámicas del aspa del ventilador HVLS MegaFan. Malla completa (a); primer plano del perfil del aspa (b).

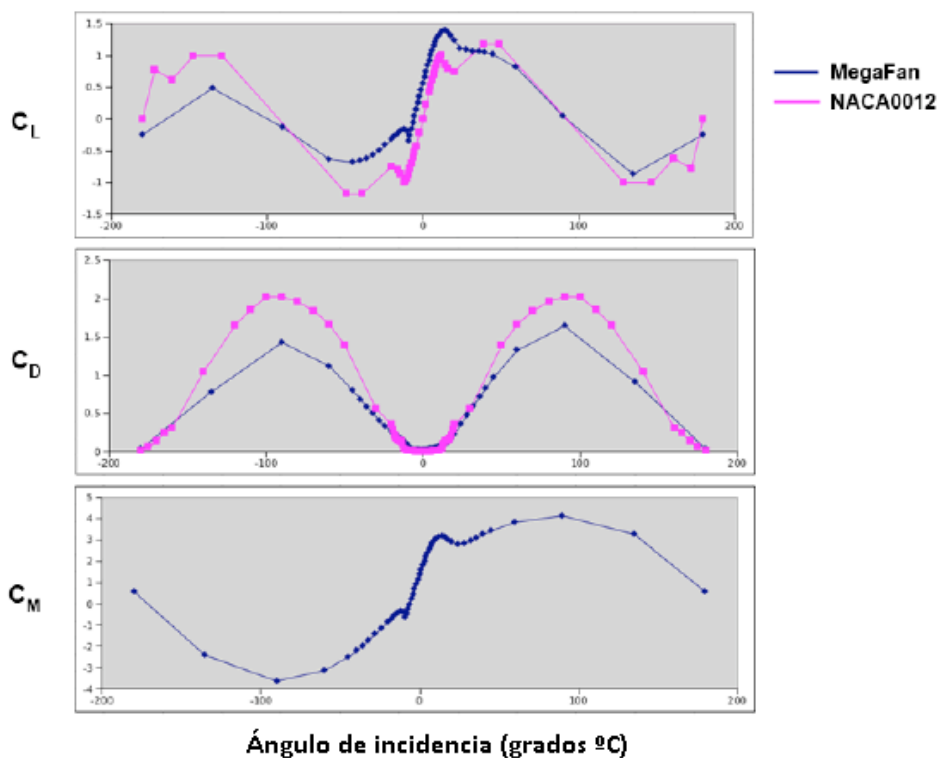


Figura 3: Coeficientes aerodinámicos en la sección del aspa del ventilador MegaFan computarizada mediante CFD. También se muestran los resultados para una sección aerodinámica NACA0012 con fines comparativos.

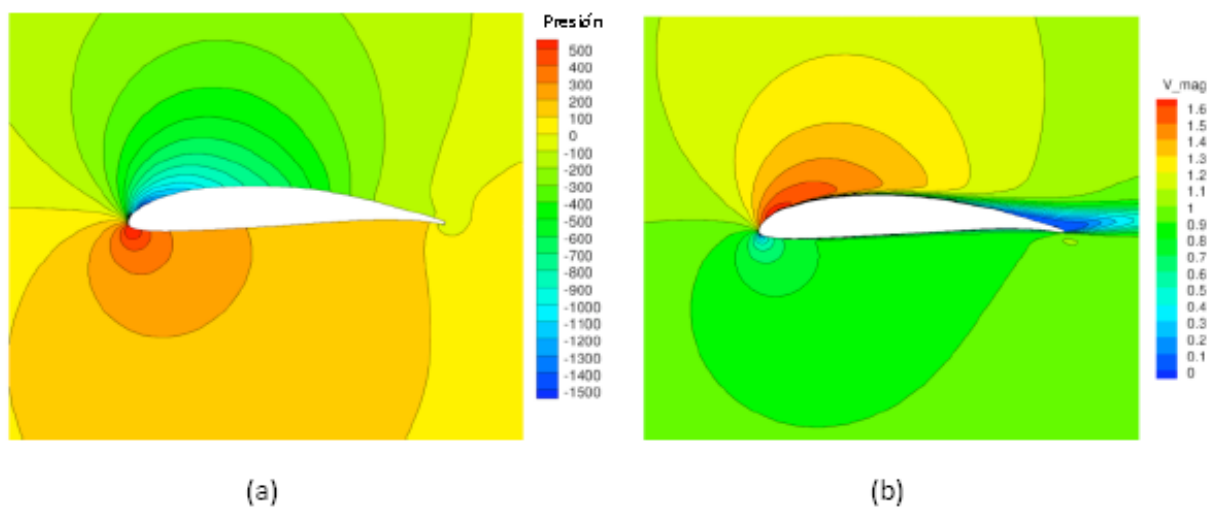


Figura 4: Contornos de presión (a) y velocidad (b) en una sección del aspa del ventilador HVLS MegaFan a un ángulo de incidencia de $\alpha = 8^\circ$.

Apice a 12,5m

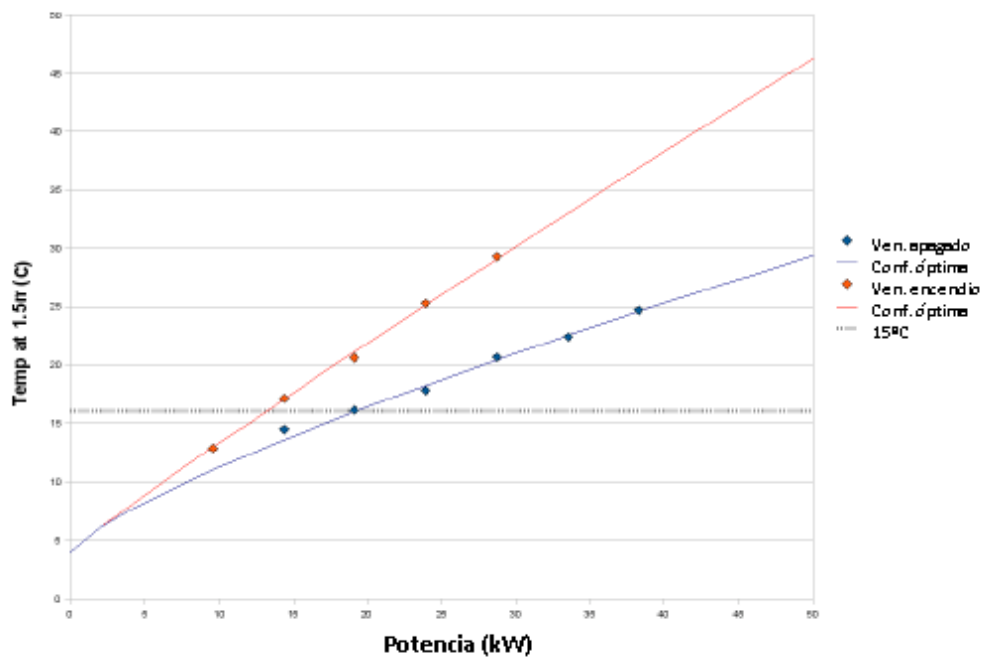


Figura 5: Temperatura a nivel del suelo como función de la potencia del calentador para una altura de ápice de 12,5m. Curvas para ventilador apagado y en funcionamiento; la línea discontinua indica 16°C.

Ventilador apagado (calentador a 29,1kW) **Ventilador encendido (calentador a 14,6kW)**

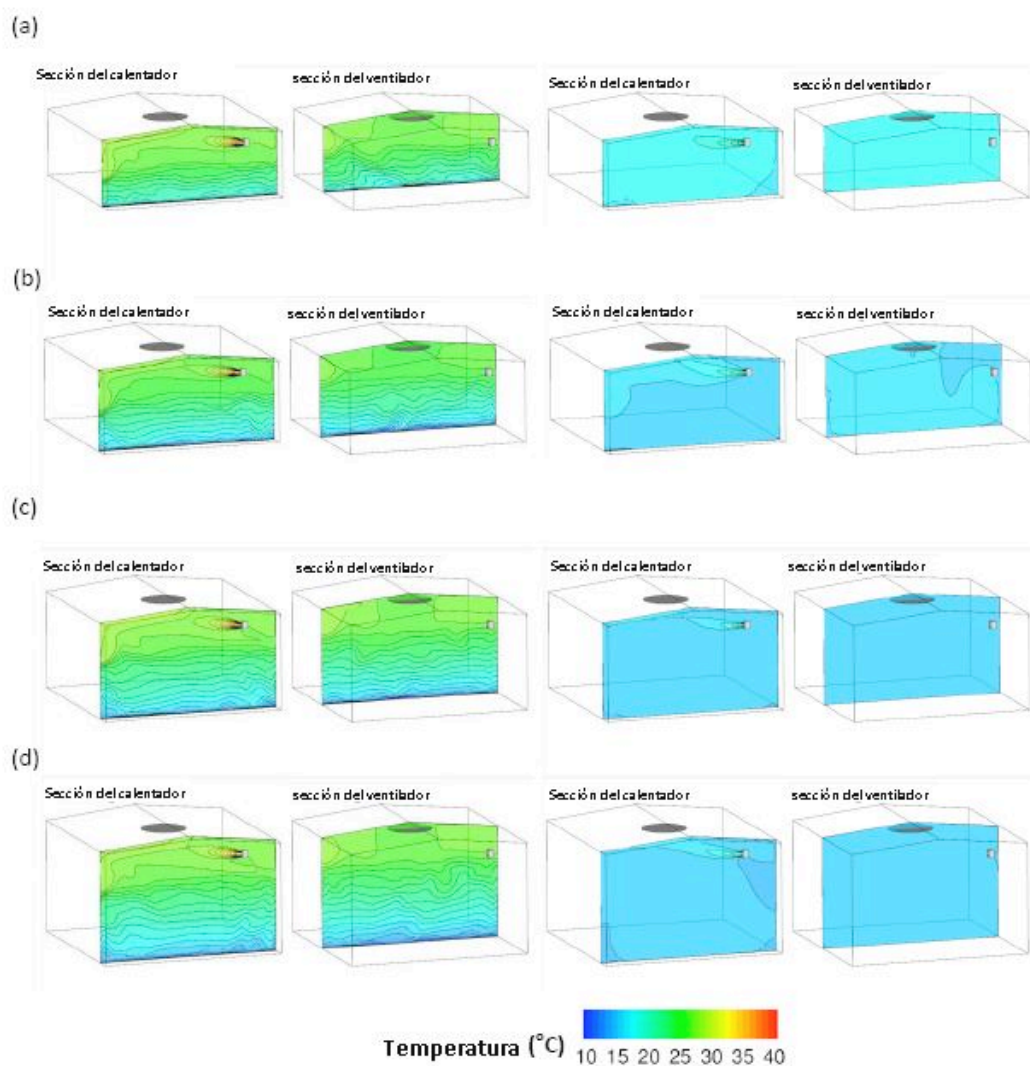


Figura 6: Contornos de temperatura representados sobre distintas secciones del almacén con el ventilador apagado (izquierda) y en funcionamiento (derecha). Alturas de ápice de 12,5m (a); 15,0m (b); 17,5m c) y 20,0m (d).

Ventilador apagado (calentador a 29,1kW)

Ventilador encendido (calentador a 14,6kW)

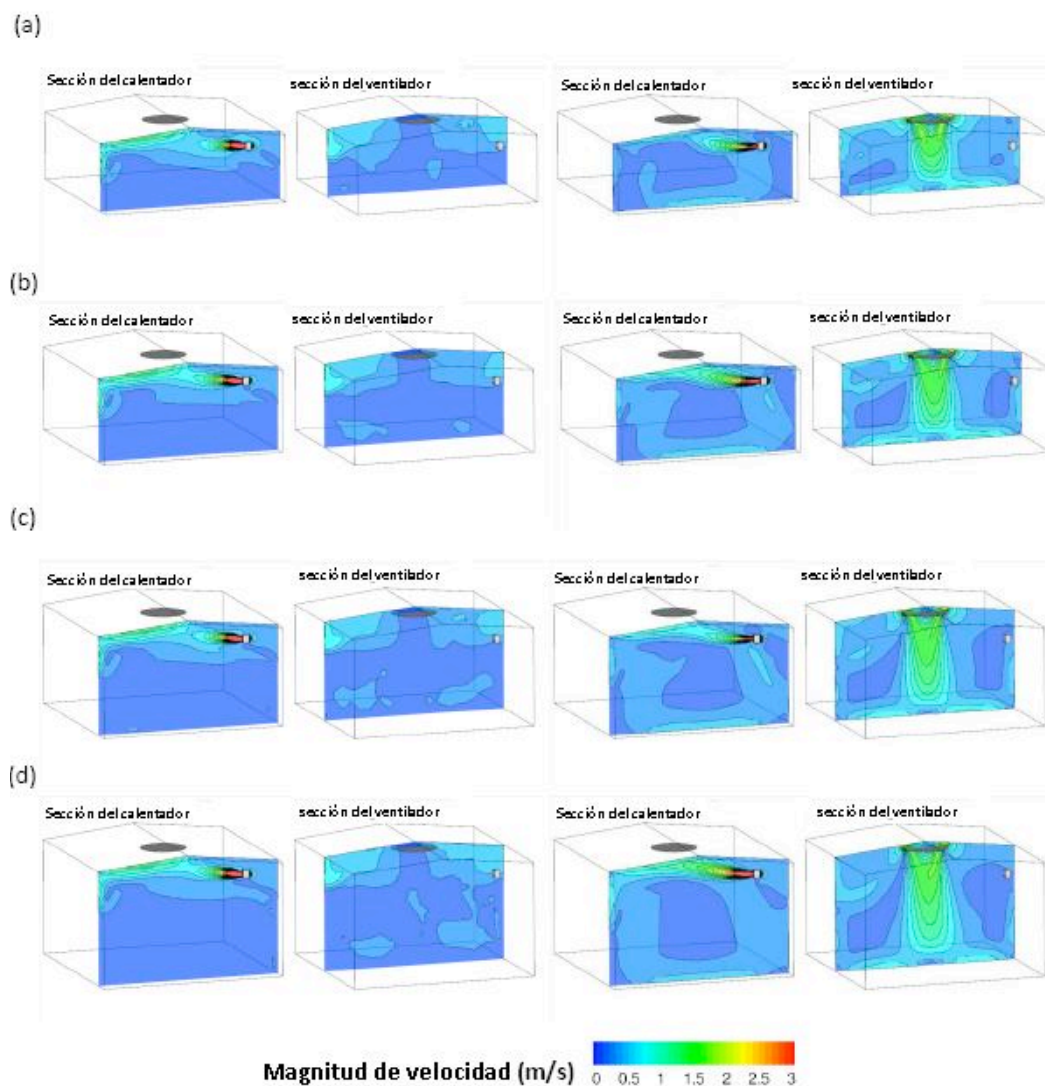


Figura 7: Contornos de velocidad representados sobre distintas secciones del almacén con el ventilador apagado (izquierda) y en funcionamiento (derecha). Alturas de ápice de 12,5m (a); 15,0m (b); 17,5m (c) y 20,0m (d).

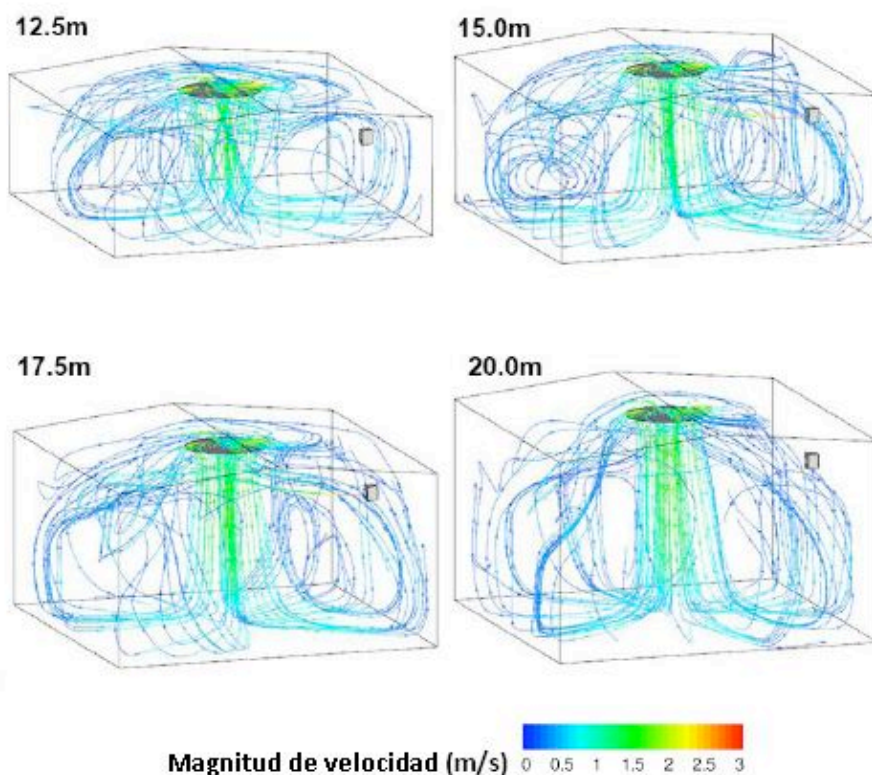


Figura 8: Líneas de corriente que ilustran el efecto “downwash” generado por el ventilador HVLS para las cuatro alturas del almacén, coloreadas por la magnitud de velocidad.

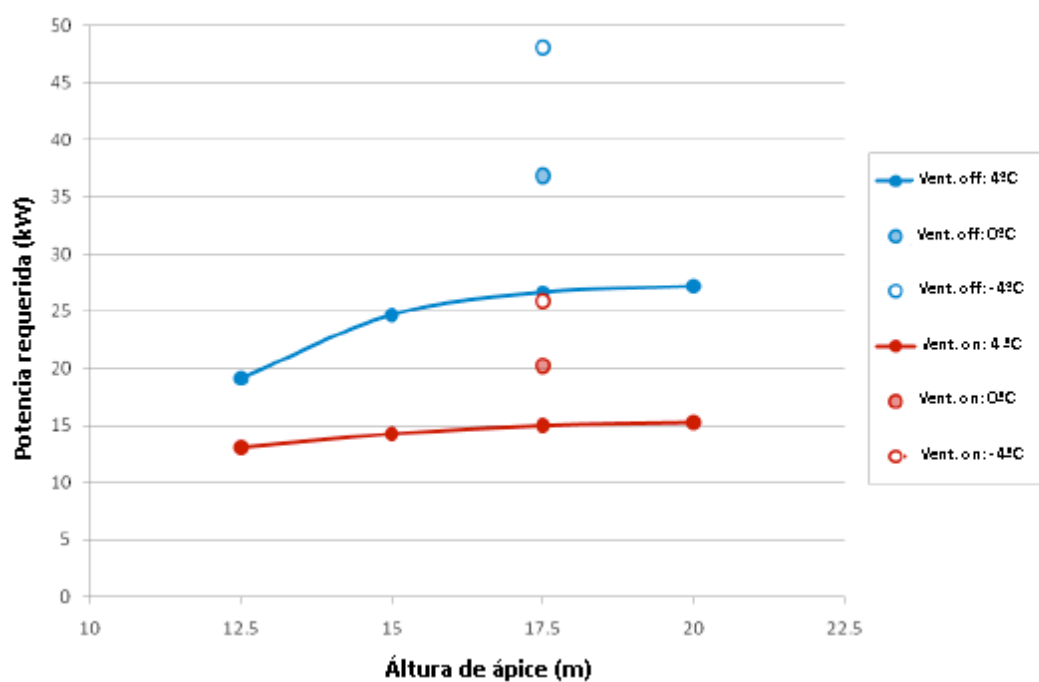


Figura 9: Gráfico que muestra la potencia de calefacción necesaria para alcanzar una temperatura media de 16°C a nivel del suelo, como función de la altura de ápice y la temperatura exterior.

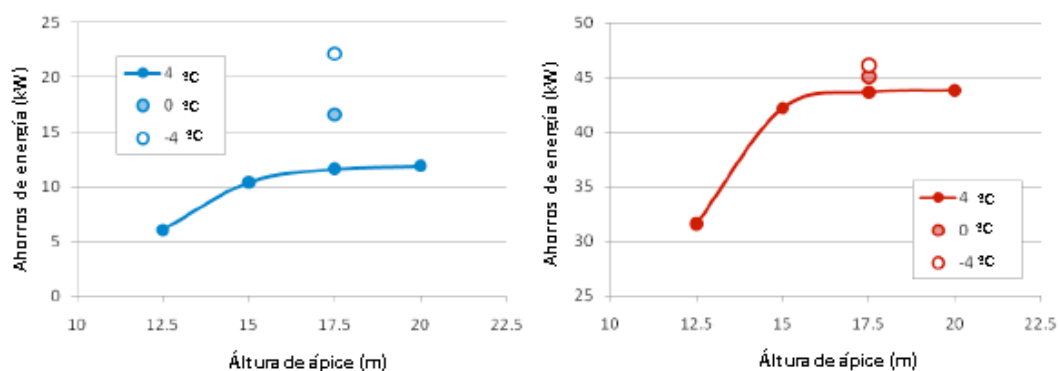


Figura 10: Gráficos que ilustran el ahorro energético en términos absolutos (a) y porcentuales (b) ofrecido por el ventilador HVLS, como función de la altura de ápice y la temperatura exterior.

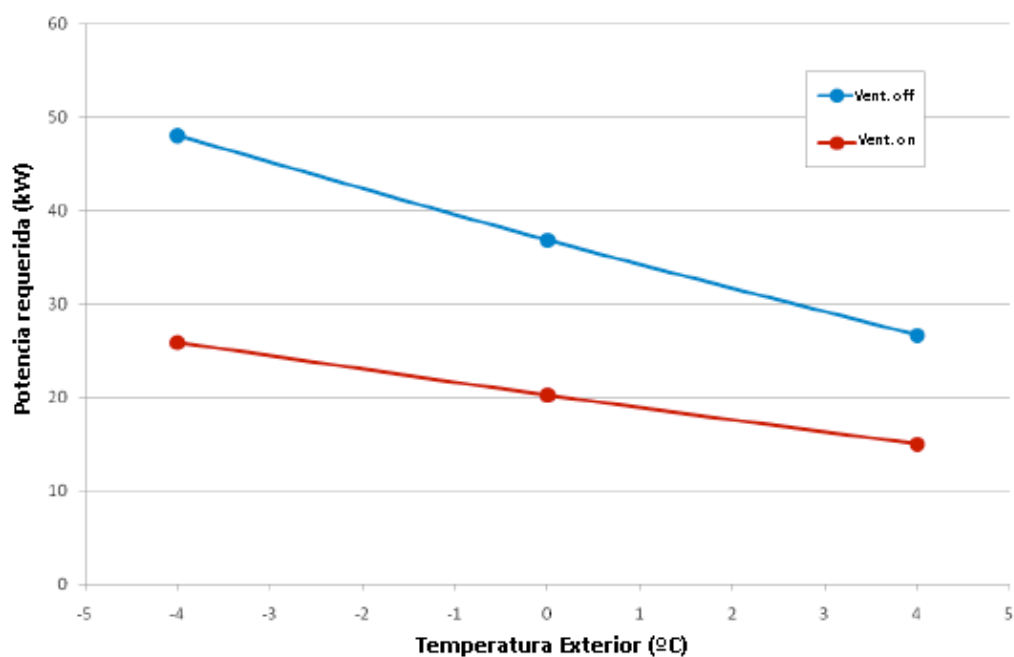


Figura 11: Gráfico que muestra la potencia de calefacción necesaria para alcanzar una temperatura media de 16°C a nivel del suelo con una altura de ápice de 17,5m, como función de la temperatura exterior.