



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Análisis computacional de la ventilación de  
una granja porcina

Computational analysis of pig farm ventilation

Autor

Rubén Romero Naudín

Director

Salvador Izquierdo Estallo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

Junio 2023



## ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen .....	4
1 Introducción .....	5
1.1 Enunciado y motivación.....	5
1.2 Antecedentes.....	6
1.3 Objetivos y alcance .....	6
1.4 Descripción de los contenidos .....	7
2 Metodología .....	7
2.1 Realización de la geometría de la granja .....	7
2.2 Mallado de la geometría.....	10
2.3 Planteamiento y resolución de ecuaciones .....	11
2.4 Condiciones de contorno .....	13
2.5 Configuración numérica .....	14
3 Resultados.....	14
3.1 Convergencia, malla y modelos.....	14
3.2 Resultados de cada caso, visual y tablas .....	18
3.3 Detalles de los resultados.....	20
4 Conclusión .....	21
5 Bibliografía.....	21



## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Reacción química en granja porcina
- Figura 2: Modelado módulo granja
- Figura 3: Colocación del ventilador
- Figura 4: Módulo aplicando simetría
- Figura 5: Módulo con ventilador aplicando simetría
- Figura 6: Malla de superficie de la geometría
- Figura 7: Mallado de volumen de la geometría
- Figura 8: Condiciones contorno módulo granja
- Figura 9: Condiciones contorno ventilador óptimo
- Figura 10: Perfil de velocidades sin ventilación
- Figura 11: Intensidad turbulenta sin ventilación
- Figura 12: Líneas de corriente sin ventilación
- Figura 13: Perfil de velocidades con ventilación
- Figura 14: Intensidad turbulenta con ventilación
- Figura 15: Líneas de corriente con ventilación



## Resumen

El amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) es la emisión atmosférica más relevante del sector agro-ganadero. El  $\text{NH}_3$  es un gas irritante que tiene un impacto negativo en la salud y el bienestar tanto de los trabajadores de las granjas como de los animales. Adicionalmente, los efectos ambientales del amoníaco no se limitan al entorno inmediato de las granjas que lo emiten; puede transportarse a largas distancias en forma de aerosol, con efectos perjudiciales para la salud de los ecosistemas. Con el objetivo de minimizar el impacto de las emisiones de  $\text{NH}_3$ , en este Trabajo Fin de Grado se analiza mediante técnicas de Fluidodinámica Computacional el sistema de ventilación de una granja, como entorno emisor de  $\text{NH}_3$ , y se realizará un estudio preliminar del efecto sobre la ventilación que tiene el uso de equipos de limpieza (por filtrado) de aire en el interior de la misma. La granja se ha modelado mediante una geometría 3D realista que representa una sección de una nave. El modelo planteado resuelve las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y turbulencia. Se ha estudiado un caso base de ventilación y un caso con el sistema de filtrado de aire. A partir del análisis de los resultados obtenidos se concluye que el sistema de filtrado de aire tiene un gran efecto sobre los patrones de flujo de aire dentro del alojamiento ganadero estudiado, siendo necesario un estudio de detalle para poder dimensionar y emplazar de forma óptima dicho sistema, de tal forma que se pueda minimizar la concentración de  $\text{NH}_3$  dentro del alojamiento sin afectar negativamente a los animales.



# 1 Introducción

## 1.1 Enunciado y motivación

Las emisiones de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) procedentes del sector agrícola en la Unión Europea datadas de 2020 fueron de 3,2 Mt, un 96,6% de las emisiones totales de este gas, de las cuales se estima que un 67 % fueron producidas en el sector ganadero, exactamente por las deyecciones ganaderas. El amoníaco ambiental varió de 5 a 30 ppm en confinamientos porcinos y las concentraciones superiores a 20 ppm de  $\text{NH}_3$  pueden tener un impacto adverso tanto en la salud de los trabajadores como de los animales.<sup>2</sup>

El nitrógeno total en los purines es relativamente fácil de medir, y así estimar el volumen generado por una parcela, en función de las necesidades del cultivo y de la cantidad de animales, y cumplir con la Directiva Nitratos. Por el contrario, el nitrógeno, en forma de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) o de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y el metano ( $\text{CH}_4$ ) no son tan simples de medir, siendo estos gases perjudiciales para los animales y humanos que lo respiran. La contaminación por amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) tiene un gran impacto en la biodiversidad, afecta el medio ambiente a través de varios mecanismos diferentes, incluso influyendo en la calidad del aire, el olor, la eutrofización, la acidificación y la toxicidad directa y también a través de efectos indirectos, producen lluvia ácida y tienen efecto invernadero. Evitar las emisiones de  $\text{NH}_3$  ha de formar parte de los objetivos de mejora de la gestión de las deyecciones ganaderas puesto que la principal fuente de nitrógeno amoniocal es la urea, seguida de la descomposición anaerobia de materia orgánica con contenido proteico.<sup>3</sup>

El amoníaco es corrosivo para la piel, ojos y pulmones, con concentraciones muy bajas en el aire. Algunos síntomas de exposición al amoníaco son quemaduras en la piel y en los ojos, dolor de garganta crónico y respiración dificultosa acompañada de tos, muchos de estos síntomas derivan en enfermedades graves de respiración como asma, colapso parcial de los pulmones, infección pulmonar como neumonía, y, en el peor de los casos, cáncer de pulmón.

Este gas no afecta únicamente a los humanos como sabemos, si no que al no contar con unas condiciones adecuadas en la calidad de aire de la granja produce que el ganado reduzca el aumento de peso y el crecimiento habitual, el ganado porcino es muy sensible a estas condiciones, ocasionando la aparición de mordeduras de cola y enfermedades respiratorias debido a la facilidad que tienen para la aspiración de gases nocivos, además, también afecta a la reproducción de los animales, esta última consecuencia afecta en un mayor nivel a las granjas de cebo y a los módulos de maternidad y cría.<sup>4</sup>

A parte de los daños en seres humanos cabe recalcar que el amoniaco afecta a la estructura de la nave, acelerando el deterioro de la misma y ocasionando una gran cantidad de dinero a tener en cuenta para el ganadero, el cual tendrá que reforzar y mantener la estructura de la nave periódicamente para su correcta firmeza y rigidez.



## Estudio de la ventilación de una granja porcina

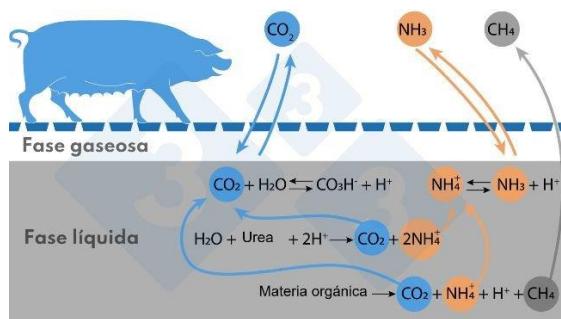


Figura 1. Reacción amoniaco en granja porcina

Fuente: (Emisiones (I), 2023)

### 1.2 Antecedentes

A día de hoy, los encargados de granjas porcinas realizan algunas medidas para minimizar la expulsión de estas contaminaciones nombradas a la atmósfera. A continuación, se enumeran algunas de estas posibles estrategias para la eliminación de contaminantes como el amoniaco en granjas porcinas:

- Mejorar las dietas y la digestibilidad de las proteínas y aminoácidos de los alimentos dados a los animales.<sup>5</sup>
- Retirar los purines de las fosas de las naves de los animales a la mayor brevedad posible, cada día mejor que cada semana, y mejor cada 6 que cada 24 horas.
- Reducir el pH de los purines a valores inferiores a 7, añadiendo ácido y utilizando equipos especialmente diseñados para este objetivo.<sup>3</sup>

Como se puede observar, ninguna de estas estrategias soluciona el problema completamente, sino que lo desplazan. Por ejemplo, medidas como la acidificación del purín pueden suprimir una gran parte del amoniaco, sin embargo, dificulta la posterior eliminación del purín ocasionando otra problemática a resolver.

Muchas otras medidas que se proponen como mejores técnicas disponibles solo se ciñen a un correcto mantenimiento de los sistemas de ventilación y extracción de desechos y orines, medidas que cualquier granja debería de hacer pese a no reducir una cantidad necesaria de amoniaco, pero si evitando una concentración desmesurada.<sup>7</sup>

### 1.3 Objetivos y alcance

Para contribuir a solucionar este problema de emisiones en las granjas se parte de la hipótesis de que el uso de equipos portátiles de filtrado de aire podría contribuir positivamente a reducir la concentración de  $\text{NH}_3$  en el interior de los alojamientos a la vez que se minimizan las emisiones al exterior. A tal efecto, el sistema de filtrado de aire se coloca en un lateral de la granja, adsorbiendo los gases procedentes de los cerdos, reduciendo así, la concentración de  $\text{NH}_3$  en el aire. Una vez filtrado el aire (sin el  $\text{NH}_3$  y otros compuestos orgánicos volátiles que también serían adsorbidos) es devuelto al interior de la granja.

De esta forma se realiza la simulación de fluido en el interior de la granja, con la incorporación del ventilador anteriormente nombrado, consiguiendo saber con detalle el

Rubén Romero Naudín



flujo másico de aire generado por el ventilador y, por tanto, saber con qué caudal incidir en la atmósfera de la granja, con esto se reduce al máximo la contaminación amoniacal en las atmosferas de las granjas porcinas, y, de esta forma, el gran problema existente por la excesiva cantidad de nitrógeno amoniacal en la atmósfera se reduzca en un gran porcentaje, puesto que se conoce que la principal fuente de este compuesto son las deyecciones de las mismas granjas porcinas.

Como resultado, se consigue una sencilla solución a una gran problemática, cuyo principal remedio comienza a ser la prohibición de la instalación de granjas en función de la proximidad con otras, cuando el consumo de carne, y, por tanto, la exportación de la misma, aumenta cada año en España. Además, al mejorar la calidad de vida de los cerdos se obtiene una mejora de la carne porcina y, no menos importante, al reducir la cantidad de amoníaco presente en el aire, mejoramos el entorno del trabajador que vive expuesto a varias enfermedades como las nombradas anteriormente.

## 1.4 Descripción de los contenidos

Los contenidos a tratar durante este trabajo de investigación se pueden separar en tres partes principales: Geometría, malla y resultados.

En primer lugar, se realizan varias geometrías de la granja a estudiar realizando las aproximaciones convenientes. En segundo lugar, se realiza un mallado discreto para analizar las geometrías realizadas y el fluido que recorre cada pared interior, además se interpondrán las condiciones de contorno, la configuración numérica y las ecuaciones a resolver mediante el método de elementos finitos que emplea el programa. Por último, se estudiarán y analizarán todos los resultados, obteniendo una simulación completa y detallada de la geometría inicial para conseguir conocer con precisión la función óptima del ventilador y como se comportaría en el interior de cada módulo.

# 2 Metodología

Para realizar la geometría se parte de un programa denominado Ansys SpaceClaim, que es la solución de modelado perfecta para acceder a respuestas 3D e instaurar una malla sin errores. Proporciona herramientas para acelerar la preparación de la geometría y llegar antes a la simulación, al tiempo que elimina retrasos entre los equipos de diseño.<sup>1</sup>

Para el mallado de las geometrías y el análisis de los resultados se emplea un programa llamado Ansys Fluent, que es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de propósito general que se utiliza, en este caso, para modelar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa y reacciones químicas. Es conocido por sus capacidades avanzadas de modelado físico y su precisión.<sup>1</sup>

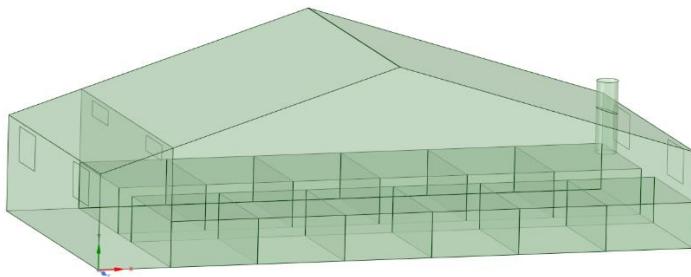
## 2.1 Realización de la geometría de la granja

Mediante Ansys SpaceClaim y una vez proyectada la idea principal se pasa a recopilar los datos iniciales aportados para la realización del proyecto.



Se parte de unos planos realistas de las 3 vistas de una granja porcina, mediante estos planos se puede recrear la geometría en 3D, considerando ciertas aproximaciones que se deben de realizar para hacer la malla lo más simplificada posible sin obviar volúmenes relevantes que puedan alterar el flujo, y realizar los futuros estudios convenientes. Además, se consideran las medidas de un ventilador para retirar el nitrógeno amoniacial, de su valor de caudal máximo, donde va situado en el módulo y donde va situada la entrada y la salida del mismo.

Para el primer análisis (Figura 2) de este módulo no se incorpora el ventilador, de esta forma se podrá ver la ventilación base que puede llegar a tener mediante las ventanas y la chimenea, es decir, observar la corriente que genera el flujo de aire en condiciones normales.

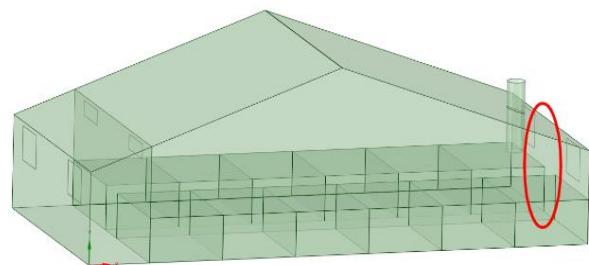


*Figura 2. Modelado módulo granja.  
Fuente: Propia*

Posteriormente, se instalará el purificador en un único módulo para analizar la ventilación por separado, este dispositivo se coloca debajo de la chimenea para mejorar el flujo de recogido de aire (Figura 3). Este ventilador es prediseñado teniendo en cuenta las dimensiones y necesidades de la granja, para ello se ha estudiado el flujo de corriente, el caudal y las secciones de entrada y salida, para abarcar cada esquina de la nave.

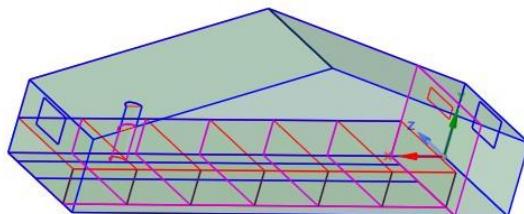
Para ello, el ventilador cuenta con un caudal de  $400 \text{ m}^3/\text{h}$ , un rango de alcance de 10 metros y genera un ruido inferior a 65 decibelios para no inferir en la convivencia y descanso de los cerdos. Además, lleva incorporado un prefiltro (exactamente de HEPA H14, que retiene un 99.995% de las partículas) y un filtro de carbono activo para adsorber el amoniaco. Las dimensiones de este purificador son de 1900 mm de alto, 440 mm de ancho y 220 mm de profundo.

El objetivo de modificar la expulsión de la corriente del ventilador es que los cerdos no pueden recibir constantemente un flujo de aire, esto podría alterar su convivencia y la posterior calidad de la carne. Además, este ventilador tiene ajustado el valor de caudal nominal para abarcar cada extremo de la granja e intentar reducir en su totalidad los gases contaminantes en el menor tiempo posible.



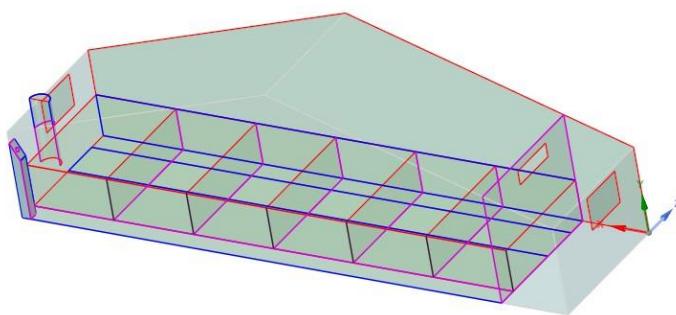
*Figura 3. Colocación del ventilador.  
Fuente: Propia*

Para mejorar los resultados obtenidos, manteniendo constantes el número de celdas que tendrá la malla inicialmente, se aplica simetría dividiendo el módulo en dos partes, de esta manera se podrá repartir el mismo número de celdas en la mitad de volumen. Para ello se parte del volumen ya creado, se realiza un plano perteneciente al eje x y al eje y, y se corta la figura obteniendo la mitad del módulo, (Figura 4) por último, se eliminan posibles líneas colindantes con el plano y superficies sobrantes que no pertenezcan al volumen que puedan interferir en la divergencia de la simulación, de esta forma las condiciones de contorno posteriormente impuestas solo pertenecen a una superficie en concreto.



*Figura 4. Módulo aplicando simetría.  
Fuente: Propia*

Se realizará la misma sucesión de pasos con la geometría que tiene incorporada el purificador, en este caso, al aplicar el plano de simetría, una de las extracciones y una de las entradas se pierden, pero al tener la mitad de volumen el cálculo es proporcional. Al resultado final se le vuelve a aplicar la opción de compartir topología para evitar la superposición de líneas (Figura 5).



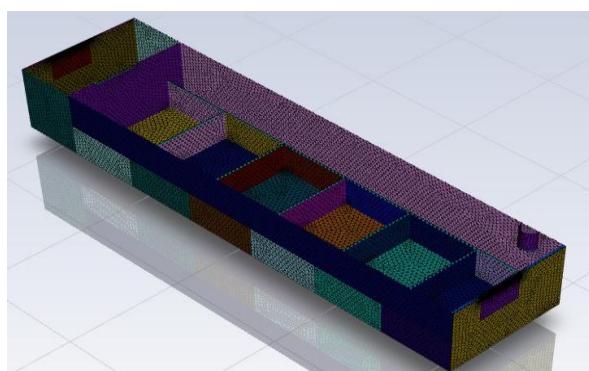
*Figura 5. Módulo con ventilador aplicando simetría.*  
Fuente: Propia

Por último, cabe recalcar una acción que se han llevado a cabo para evitar futuros problemas en el mallado. Esta consta de realizar un volumen que recoja las zonas externas de la geometría, además, se realizan grupos con los nombres de las condiciones de contorno en las superficies pertenecientes a este volumen, de esta forma el programa de mallado reconoce directamente que la superficie de entrada, por ejemplo, pertenece al volumen. Para las paredes interiores, que no pertenecen a dicho volumen, se han agrupado en un componente denominado “Wall” indicando que son superficies donde se debe de crear una capa límite.

## 2.2 Mallado de la geometría

Mediante ANSYS Fluent se realizará el mallado del módulo de la granja, es por eso que se necesita de una malla discreta, con un gran número de celdas, para asegurarse de que los valores de los resultados sean prácticamente idénticos que los datos que se encontrarán realmente.

Inicialmente, se importa la geometría realizada, en formato CAD, ajustando las unidades y se inhabilita la opción de agregar controles de tamaño local. Posteriormente, se ajusta el tamaño de la malla superficial variando el tamaño máximo y mínimo de elemento hasta dar con un número de nodos razonable (120 y 10 mm), además, se pondrán 4 celdas por brecha para mejorar el valor de los resultados, una relación de crecimiento de 1.2 y una proximidad de alcance en los bordes, de esta forma se consigue una malla superficial de exactamente 48.000 caras (Figura 6).



*Figura 6. Mallado de superficie de la geometría.*  
Fuente: Propia



A continuación, se describe la geometría teniendo en cuenta que consta únicamente de regiones fluidas sin huecos, además se deben desactivar las opciones de considerar las paredes como “internal”, puesto que dejaría pasar el fluido, y compartir topología, debido a que esa opción ya se ha aplicado en la geometría y puede dar lugar a la supresión de líneas o superficies relevantes.

Antes de generar la malla de volumen se actualizan las condiciones (de todos aquellos elementos que son sólidos o se desprecian) y las regiones (de todos aquellos elementos considerados fluidos, en nuestro caso el aire que circula por el interior de la granja) y se añaden tres condiciones de capas en las regiones fluidas y sólidas, con un crecimiento únicamente en las paredes y con una transición suave con un valor de 0.272 de relación de transición (velocidad con la que crecen los elementos).

Por último, para el mallado de volumen, se crea una malla de un millón de celdas (995.000 exactamente) llenada por hexaedros (poly-hexcore) debido a que este tipo de malla nos proporciona resultados más exactos (Figura 7), que cualquier otra forma geométrica, al adaptarse a cada intersección de superficies. Para ello se ajusta unos valores máximos y mínimos de longitud de celda, siendo estos valores 48 y 6 mm, además se añaden 4 capas de amortiguamiento (capas necesarias para cubrir la rápida transición entre las celdas más finas y las celdas más gruesas) y 3 capas de cáscara (capas que controlan el espacio entre el núcleo del hexaedro y la geometría).

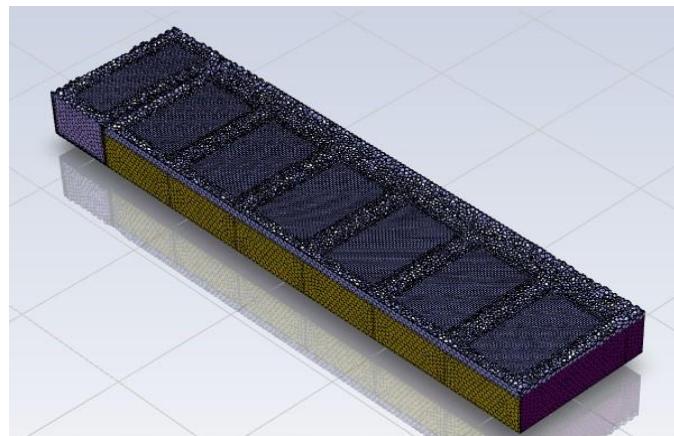


Figura 7. Mallado de volumen de la geometría.

Fuente: Propia

Para la malla de la geometría con la incorporación del ventilador se realizan los mismos pasos explicados anteriormente con la geometría de referencia, la única diferencia es que, en este caso, el número de caras, y, por tanto, el número de celdas aumentará al existir nuevas caras incorporadas con el ventilador, de este modo tenemos un total de 1.001.000 celdas.

## 2.3 Planteamiento y resolución de ecuaciones

Para la resolución de este modelo se tiene que plantear las 6 ecuaciones que se resolverán en cada celda. En primer lugar, existen 3 ecuaciones de cantidad de movimiento al tener una geometría representada a partir de 3 vectores, luego se



resolverá la ecuación de continuidad y, por último, las 2 ecuaciones pertenecientes al modelo de turbulencia,  $k$  y  $\omega$ .

La teoría que sigue se limita a flujos incompresibles. Filtrando las ecuaciones de continuidad (masa) y momento (cantidad de movimiento), se obtienen las siguientes expresiones respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij}) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Donde, como se puede comprobar, se obtiene 1 ecuación de continuidad (1) y 3 ecuaciones de momento (2) al haber 3 ejes.

Para el modelo  $k$  y  $\omega$  se comienza hablando de la energía cinética de turbulencia, y la tasa de disipación específica, ambas se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b} \quad (4)$$

$G_k$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de la velocidad media y  $G_b$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido al empuje.

A continuación, se plantean las ecuaciones de producción de  $k$  y  $\omega$  (5 y 6) para obtener sus valores a partir de las ecuaciones de transporte:

$$G_k = -\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (6)$$



Siendo  $\alpha$  un coeficiente dependiente del número de Re.

También hay que tener en cuenta la ecuación de energía, en caso de que este comando este habilitado, y las ecuaciones de estados dependientes de las funciones de estado del material.

Energía	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho) \dot{i}u = -\rho \operatorname{div}u + \operatorname{div}(k \operatorname{grad}T) + \Phi + S_i$
Ecuaciones de estado	$p = p(\rho, T)_y \quad i = i(\rho, T)$

## 2.4 Condiciones de contorno

Una vez creada la malla del primer módulo, se continúa aplicando las condiciones de contorno para, posteriormente, inicializar y calcular los resultados. Para las condiciones de contorno se empleará una condición de presión de entrada en las ventanas externas, situadas a este y a oeste, y una condición de escape de ventilador en la chimenea por el cual se simula que se libera el aire. A continuación, se aplica una condición de periodicidad a las paredes situadas a norte y sur, se aplica una condición de pared en las paredes interiores y en el resto de superficies como el techo y el suelo, y, por último, se aplica una condición de flujo máscico en las rejillas situadas en el suelo por las cuales se escapan los gases nocivos que se quieren estudian. Con respecto al resto de volumen no inscrito se considera fluido, en este caso aire. (Figura 8)

En relación a los valores iniciales, se aplicará un valor nulo de velocidad de entrada y se impondrá una curva característica del ventilador en la chimenea, de esta forma se genera una depresión en la chimenea forzando a entrar aire por las ventanas, esta es la forma más correcta de aproximar la solución a la real.

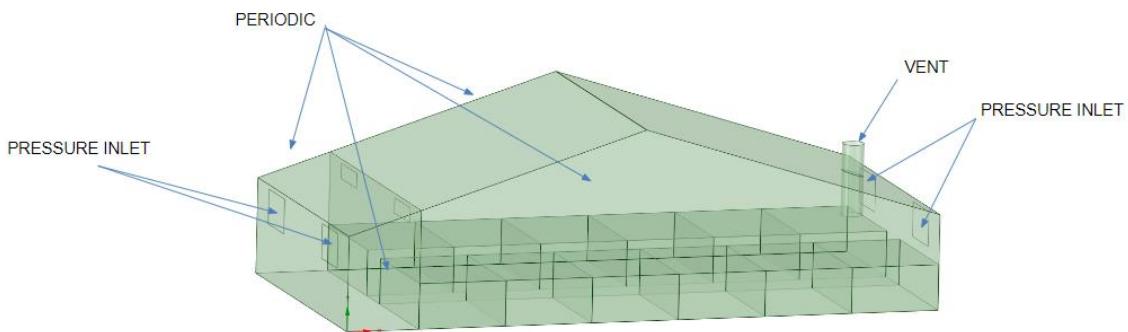


Figura 8. Condiciones contorno módulo granja.  
Fuente: Propia

A continuación, se aplicarán las condiciones de contorno en el módulo con la incorporación del purificador (figura 9), de esta forma tendremos que aplicar una presión de entrada y un escape por ventilador en los propios compartimentos del aparato para que el fluido atraviese el ventilador y conocer el flujo de aire que absorbe y, por tanto, la



cantidad de contaminantes que podemos retirar. En el caso del ventilador tendría de nuevo un volumen no inscrito en el interior, puesto que el ventilador se considera hueco por dentro, este se inscribe como fluido, de nuevo aire.

Para los valores iniciales se hará un proceso similar al anterior pero esta vez en el ventilador, se creará una depresión en la salida del ventilador mediante la curva característica para forzar la entrada del aire exterior a su interior, sin embargo, en la entrada se recurre a un valor de presión.

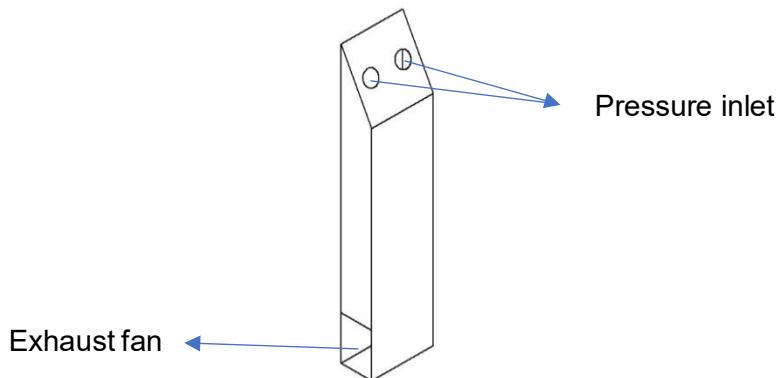


Figura 9. Condiciones contorno ventilador óptimo.

Fuente: Propia

Por último, cabe recalcar que, al aplicar simetría en el módulo de estudio, la fachada que coincide con el plano de simetría pasará a tener una condición de contorno de simetría, de esta forma el programa considera crear una capa límite en esa pared, pero teniendo en cuenta que la figura está dividida en dos partes iguales.

## 2.5 Configuración numérica

El funcionamiento de la configuración numérica de Fluent consiste en dividir el dominio computacional en volúmenes de control discretos según la malla empleada. Integrar las ecuaciones sobre los volúmenes de control individuales para construir un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables incógnita (en nuestro caso velocidad, presión y temperatura). Linealizar las ecuaciones discretizadas y resolver el sistema de ecuaciones linealizado resultante para obtener los valores de las variables incógnitas del problema. (volúmenes finitos).<sup>6</sup>

# 3 Resultados

## 3.1 Convergencia, malla y modelos

Una incorrecta convergencia es la razón más común de los malos resultados. Muchas veces no es posible monitorear los residuos el suficiente tiempo para verificar que se ha alcanzado una solución adecuada o el modelo elegido no es el correcto debido al régimen del caso a estudiar, pudiendo ser este laminar o turbulento en distintas zonas

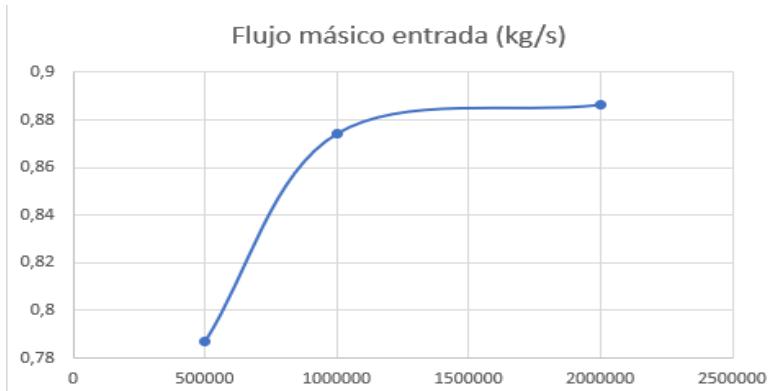


## Estudio de la ventilación de una granja porcina

de la geometría. Además, tener en cuenta que una solución convergente no siempre es una solución correcta. Para ello hay que seguir las siguientes prácticas:

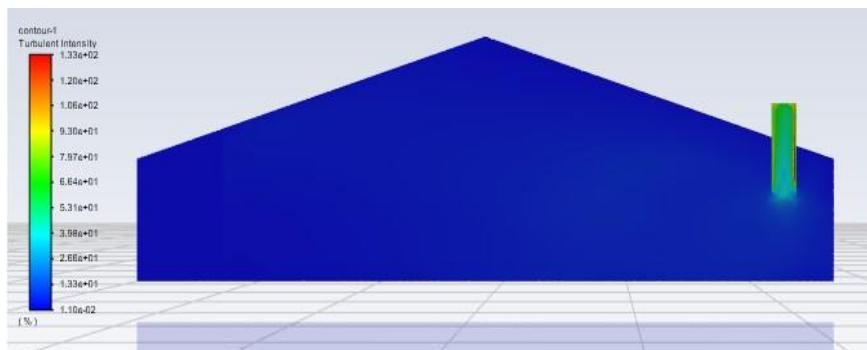
En primer lugar, se describen los casos que se quieren llevar a cabo una vez realizadas las mallas en la geometría. Se van a estudiar dos casos, partiendo de la geometría sin ventilador se analizará un primer caso suponiendo las rejas del suelo como pared. Para la segunda geometría se realizará de la misma forma para calcular la eficiencia entre un modelo y otro.

Como hemos visto es importante asegurar la convergencia del modelo, para ello se realiza una misma simulación tres veces modificando únicamente el número de los nodos de la malla, de esta forma podremos apreciar como varían los resultados en función del tamaño de las celdas, al aumentar el número de celdas el valor de flujo másico a la salida toma valores más próximos a la realidad hasta que en un número determinado de nodos, el valor ya no asciende significativamente y se puede dar por concluida la convergencia seleccionando dicha malla para obtener los resultados. En este caso, la malla de 2.000.000 celdas es adecuada para el estudio como se puede apreciar en la siguiente gráfica:



Se estudian las gráficas de YPlus e intensidad turbulenta en el plano de simetría del módulo para comprobar que los valores se han ido adecuando al aumentar el número de celdas y son lo más cercanos posibles a los correspondientes a un modelo bien convergido. Como se observa en las siguientes figuras se adecuan los valores:

Gráficas de Intensidad turbulenta e YPlus para la malla de 500.000 celdas:

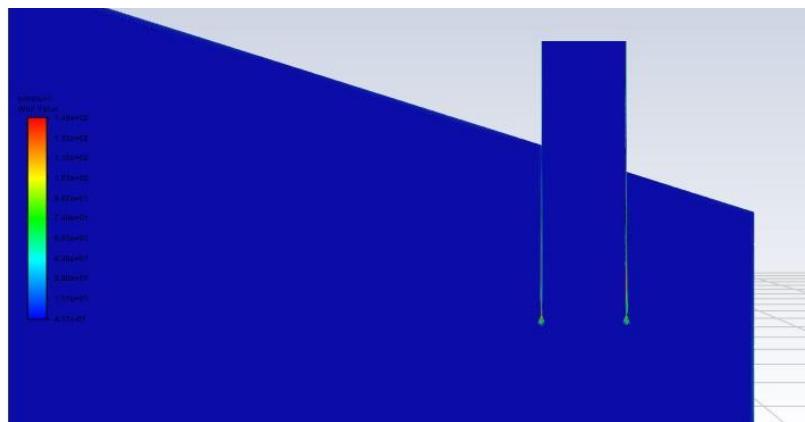
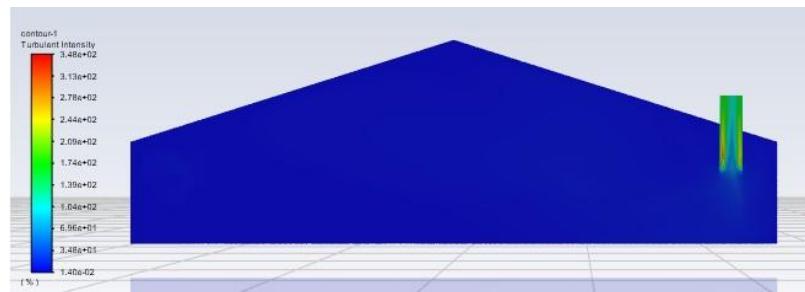




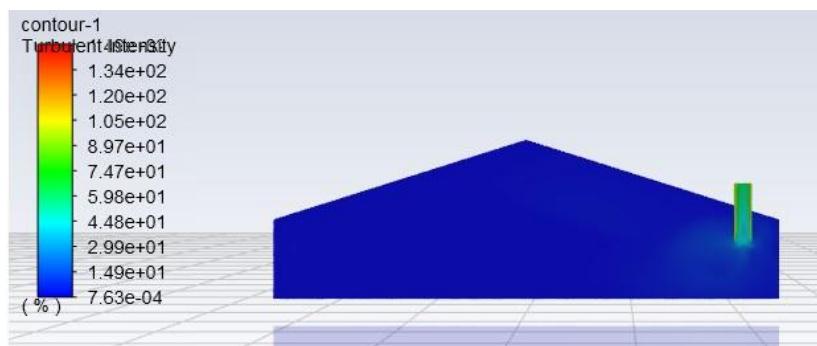
## Estudio de la ventilación de una granja porcina



Gráficas de Intensidad turbulenta e YPlus para la malla de 1.000.000 celdas:

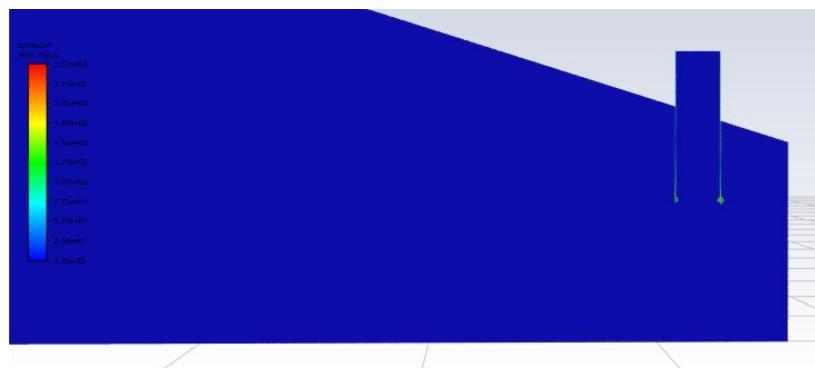


Gráficas de Intensidad turbulenta e YPlus para la malla de 2.000.000 celdas:





## Estudio de la ventilación de una granja porcina



A continuación, se ajusta el modelo, para ello hay que seleccionar la manera en la que el programa resolverá las incógnitas, en este caso es SST k-omega puesto que se trata de un régimen turbulento. Posteriormente, se definen los materiales que se emplearán durante la simulación, en este caso únicamente se tiene un fluido, que es aire, y un sólido que es aluminio, los valores predeterminados de los materiales los tiene definidos el programa.

Seguido de este paso, se ajustan las condiciones de celda y de contorno, dando valores iniciales a las condiciones de contorno impuestas anteriormente, en este caso se aplica un valor de la curva característica en los escapes de los ventiladores, esta curva tiene un valor nominal de 100 pascales y una forma parabólica proporcional al valor del caudal. Además de estos valores podemos realizar multitud de aplicaciones como cambiar la referencia de los ejes, definir expresiones, corregir las interferencias de la malla o imponer opciones en la dinámica

Antes de lanzar el caso hay que indicar las características de la solución, para ello se introducen los parámetros de los métodos y controles empleados, en este caso se ha optado por un esquema acoplado con los métodos por defecto y unos factores de relajación explícitos en tiempo por defecto. Además, se puede realizar gráficas de definición de informes que den valores relevantes en función de las iteraciones del cálculo, de esta forma se pueden obtener valores exactos que serán estables al realizar un gran número de iteraciones, contrastando además el tiempo de la gráfica de residuales.

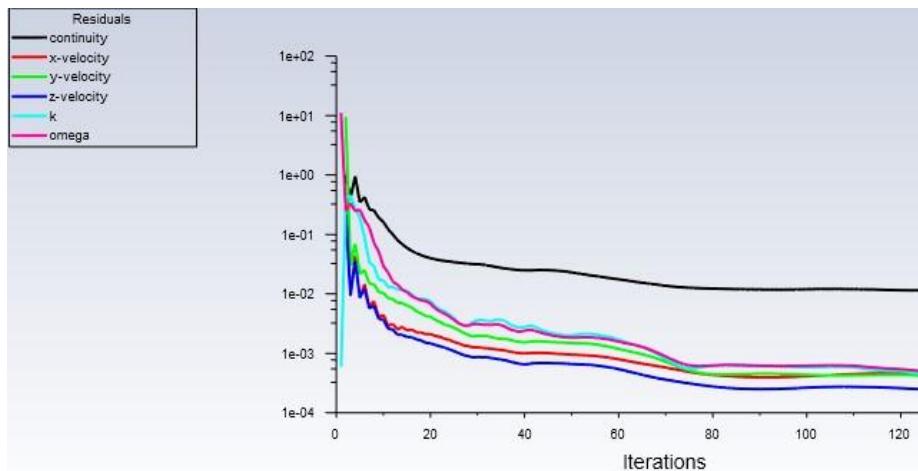
Posteriormente, se debe indicar como queremos que sea la inicialización, en este caso se selecciona una inicialización estándar. Para que la gráfica no converja antes de las iteraciones impuestas, se ha de quitar el valor de comprobación de convergencia puesto que, si la gráfica alcanza este valor, la simulación se detiene y no se obtendrían valores tan exactos al limitar la resolución de ecuaciones.

Model	Zone	Value
General	Geometry	3D
	Solver	ANSYS Fluent 2020 R2 double precision
	Time Formulation	Steady
	Gravity	Enabled
Materials	solid	Aluminum Density: 2700 kg/m <sup>3</sup>



	Mixture gas	Composition: CO <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> N <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub>
Models	Multiphase	Implicit
	Viscous (Turbulence)	Model k-omega SST
	Energy	Enabled
	Species Transport	Enabled
Initialization	Standard	Default

Para asegurarse que los resultados son correctos se realiza una gráfica de residuales donde se representa la resolución de las ecuaciones. Se pueden apreciar dos ecuaciones extras que son k y omega, seleccionadas en el ajuste de método, y las ecuaciones de velocidad y continuidad. Esta gráfica se puede detener una vez que los valores residuales desciendan de 0.001. Además, Se quiere saber, una vez realizada la simulación, cuáles son los valores de salida (outlet), en este caso el valor de flujo másico que sale de la chimenea. Para ello se realiza una gráfica que avance en función de las iteraciones para obtener una aproximación real de este valor.



Para finalizar, una vez realizado el cálculo y examinada la convergencia de datos es cuando se realiza el refinamiento en caso de que la gráfica de residuales no se desarrolle con los valores esperados. Para ello se impone que en las zonas donde el valor de la intensidad turbulenta y el Y plus (Constante similar a Re) no entren en los valores requeridos ( $I_{turbulenta} < 50$  y  $Y_{plus} > 300$ ) se refine la malla para mejorar los resultados y que las variables entren dentro de los varemos solicitados, este refinamiento se aplica en nivel 4 de capa y se reitera en función de las celdas añadidas, en este caso el refinamiento solo ha actuado en la chimenea por lo que el número de celdas añadidas es pequeño.

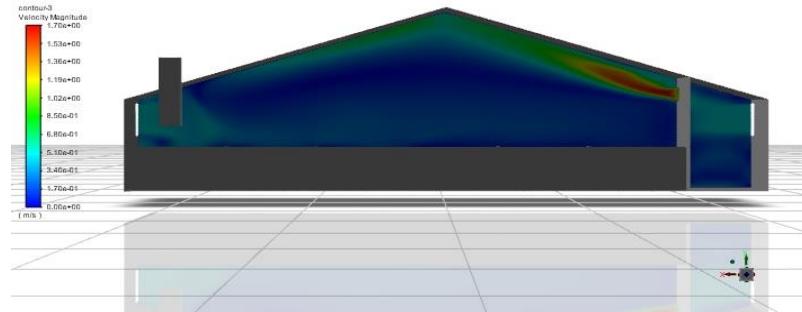
### 3.2 Resultados de cada caso, visual y tablas

A continuación, se van a representar, en ambos casos, los perfiles de velocidad y la intensidad turbulenta en el plano de simetría del módulo de la granja y las líneas de corriente que genera el flujo en una vista isométrica. En el caso de las líneas de corriente, las representadas de color verde corresponden a las de entrada por las

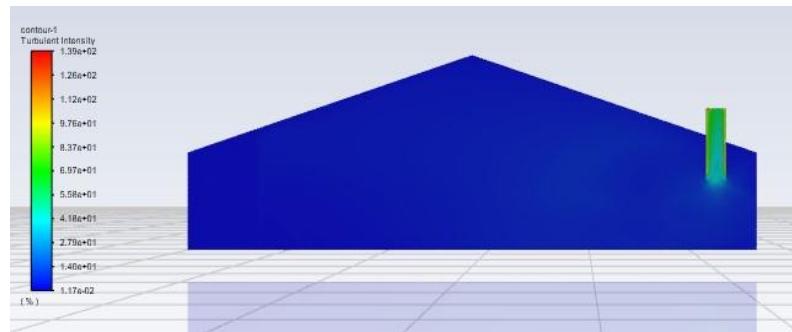


## Estudio de la ventilación de una granja porcina

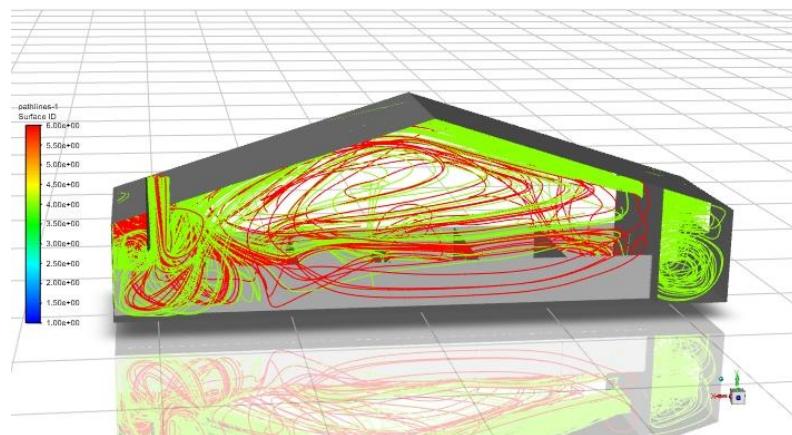
ventanas situadas en el pasillo y las rojas a las de entrada por las ventanas contiguas a la chimenea.



*Figura 10. Perfil de velocidades sin ventilación.  
Fuente: Propia*



*Figura 11. Intensidad turbulenta sin ventilación.  
Fuente: Propia*

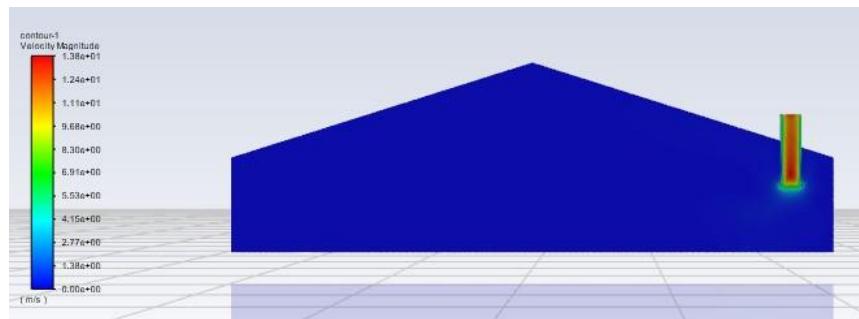


*Figura 12. Líneas de corriente sin ventilación.  
Fuente: Propia*

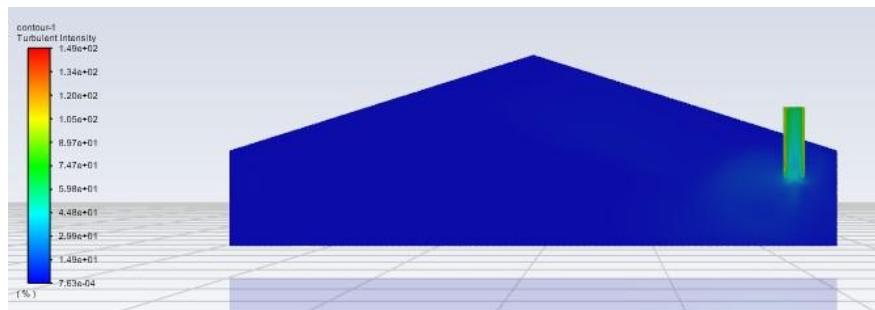
En el caso donde se incorpora el purificador, las líneas de corriente representadas de color verde corresponden a las de entrada por las ventanas situadas en el pasillo, las rojas a las de entrada por las ventanas contiguas a la chimenea y las líneas azules oscuras y claras corresponden a la entrada y salida del purificador.



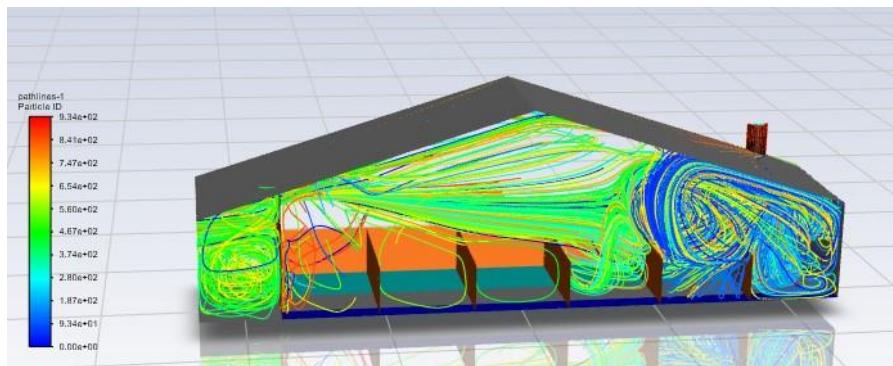
## Estudio de la ventilación de una granja porcina



*Figura 13. Perfil de velocidades con ventilación.  
Fuente: Propia*



*Figura 14. Intensidad turbulenta con ventilación.  
Fuente: Propia*



*Figura 15. Líneas de corriente sin ventilación.  
Fuente: Propia*

### 3.3 Detalles de los resultados

Se puede apreciar como los valores en el perfil de velocidades y en las líneas de corriente son superiores en el caso con ventilación debido a la ayuda aportada por el purificador, mejorando así, la evacuación de los gases en el interior de la nave. Sin embargo, también existe un aumento de la velocidad del aire a la altura de los emplazamientos de los animales, lo que puede empeorar el confort de los mismos.

Por lo tanto, es una buena práctica estudiar los resultados de la simulación obtenidos. Estos deben verificarse con estudios experimentales en la geometría real, con la teoría de la mecánica de fluidos y, a veces, con el instinto y criterio del propio usuario.



## 4 Conclusión

Como se ha podido comprobar mediante las gráficas de los resultados, los patrones de flujo cambian por completo entre el caso del modelo sin ventilación y el caso que tiene incorporado el purificador, por lo tanto, se llega a la conclusión de que el dispositivo puede ser empleado como un equipo comercial que reducirá considerablemente los gases nocivos, además puede tener una influencia notable a pesar de no haberse optimizado la posición, suponiendo la incorporada en el texto como la más óptima según nuestro criterio y conocimiento. Todos los modelos se han desarrollado rigurosamente siguiendo las prácticas de ingeniería, contrastando las actividades con los manuales de CFD y obteniendo información adicional de pautas para la mejora de los casos.

El desarrollo de CFD es un aprendizaje costoso, repleto de mucha teoría y con un trasfondo mecánico que capacita al ingeniero para poder realizar simulaciones de diversidad de geometrías, ya no solo expuestas a gases como una granja, si no infinidad de casos fluidodinámicos y termodinámicos.

## 5 Bibliografía

- <sup>1</sup>«Ansyst Fluent | Fluid Simulation Software». <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (13 de diciembre de 2023).
- <sup>2</sup>«Calidad del aire en la granja: ¿Qué respiran sus cerdos?» *Calidad del aire en la granja: ¿Qué respiran sus cerdos? | Alltech*. <https://www.alltech.com/es-es/blog/calidad-del-aire-en-la-granja-que-respiran-sus-cerdos> (20 de diciembre de 2023).
- <sup>3</sup>«Emisiones (I): ¿Cómo se generan las emisiones de gases de efecto invernadero y de amoníaco en nuestras granjas?» 2023. [https://www.3tres3.com/articulos/¿como-se-generan-los-gei-y-el-amoniaco-en-nuestras-granjas\\_49353/](https://www.3tres3.com/articulos/¿como-se-generan-los-gei-y-el-amoniaco-en-nuestras-granjas_49353/) (6 de diciembre de 2023).
- <sup>4</sup>Garcia, Mady. 2022. «Mejora de la ventilación en las instalaciones para ganado porcino». *Ventum*. <https://ventumidc.es/blog/ventilacion-instalaciones-ganado-porcino/> (15 de febrero de 2024).
- <sup>5</sup>«Manejo para reducir la emisión de amoníaco en granjas porcinas». <https://porcinews.com/practicas-de-manejo-para-reducir-la-emision-de-amoniaco-en-granjas-porcinas/> (12 de diciembre de 2023).
- <sup>6</sup>«Metodología de simulación numérica en Fluent».
- <sup>7</sup>«Mejores tecnologías disponibles en porcino y aves». <https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/publicaciones/Mejores-tecnicas-porcino-aves.aspx/> (25 de junio de 2024).