

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER

### ***DETERMINACIÓN DE REJILLA ÓPTIMA DE VENTILACIÓN EN SISTEMAS DE DESODORIZACIÓN***

**Estudiante**  
**Director**  
**Codirector**  
**Departamento**  
**Curso académico**

*González Ibáñez, Ander*  
*Peña Bandrés, Alberto*  
*Izquierdo Ereño, Urko*  
*Ingeniería Energética*  
*2020-2021*

*Bilbao, 11 de junio de 2021*



## Resumen trilingüe

### Resumen

El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) tiene como objetivo el análisis fluidodinámico del flujo de aire a través de elementos terminales del sistema de impulsión mediante la realización de simulaciones detalladas de las rejillas de ventilación en sistemas de desodorización del CABB (Consortio de Aguas Bilbao Bizkaia) para estudiar la eficiencia y margen de mejora de las mismas. Dicho estudio se llevará a cabo mediante técnicas de CFD (mecánica de fluidos computacional) a fin de lograr una configuración de rejilla óptima, estudiando en su proceso parámetros como la perpendicularidad del flujo aéreo, su homogeneización a lo largo de la abertura y las pérdidas de carga generadas pertenecientes a diversas alternativas diseñadas.

Palabras clave: ventilación, rejilla, desodorización, simulación CFD.

### Laburpena

Segidan aurkezten den Master Amaierako Lan (MAL) honen xedea aireztapen sistemako inpultsio atala eratzen duten muturreko elementuetan zeharreko aire fluxuaren analisi fluidodinamikoa da. Delako ikerketa Bilbao Bizkaia Ur Partzuergoko (CABB) usaina ezabatzeko instalazioetan kokatutako sareten simulazio xehatuaz gauzatuko da, hauen efizientzia eta hobekuntza tartea ikertuz. Ikerlan hau burutzeko CFD (fluidoen mekanika konputazionala) teknikez baliatuko da aireztapen sareto optimoa lortzearren, prozesuan diseinatutako alternatiben aire fluxuaren elkarzutasuna, irekiduran barrena homogeneizazioa eta sortutako karga galerak bezalako parametroak ikasiz.

Hitz-gakoak: aireztapena, sareta, usain ezabaketa, CFD simulazioa.

### Abstract

The following master's thesis aims to perform the fluid dynamic analysis of the flowing air through terminal elements involving impulsion systems by detailed simulations of ventilation grilles installed within Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia's (CABB) deodorization installations. Such investigation is carried out in order to examine the efficiency and room for further improvement of said components. The research for an optimal ventilation grille configuration will be conducted via computational fluid dynamics (CFD), analyzing parameters regarding several alternatives such as flow direction, flux homogenization along the opening and pressure drop.

Key words: ventilation, grille, deodorization, CFD simulation.



# Índice

<b>Resumen trilingüe</b> .....	I
Resumen.....	I
Laburpena .....	I
Abstract .....	I
<b>Índice</b> .....	II
<b>Lista de tablas</b> .....	V
<b>Lista de ilustraciones</b> .....	V
<b>Lista de acrónimos</b> .....	XI
<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>2. Contexto</b> .....	2
2.1. Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia.....	2
2.2. Desodorización .....	4
2.3. Iniciativas del CABB en desodorización .....	6
2.4. Ventilación .....	9
2.4.1. Ventilación natural.....	9
2.4.2. Ventilación forzada o mecánica.....	10
2.5. Ventiladores.....	13
2.5.1. Ventiladores centrífugos.....	14
2.5.2. Ventiladores axiales .....	17
2.6. Elementos terminales de impulsión.....	20
2.6.1. Rejillas .....	20
2.6.2. Difusores.....	21
2.6.3. Toberas .....	22
<b>3. Objetivos y alcance del trabajo</b> .....	23
<b>4. Antecedentes</b> .....	24
<b>5. Análisis del estado del arte</b> .....	26
<b>6. Beneficios que aporta el trabajo</b> .....	30
<b>7. Fundamentos teóricos</b> .....	32



7.1.	Definición de aire y composición .....	32
7.2.	Propiedades del aire.....	32
<b>8.</b>	<b>Descripción del software utilizado.....</b>	<b>36</b>
8.1.	Metodología de resolución .....	37
8.2.	Hipótesis y leyes.....	38
8.3.	Modelado de turbulencia .....	44
8.3.1.	Ecuaciones RANS .....	47
<b>9.</b>	<b>Análisis de alternativas.....</b>	<b>53</b>
9.1.	Descripción del procedimiento .....	53
9.1.1.	Geometría.....	53
9.1.2.	Mallado.....	57
9.1.3.	Modelos físicos.....	58
9.1.4.	Condiciones de contorno .....	61
9.1.5.	Simulación y visualización de resultados.....	63
9.2.	Geometrías y mallados.....	63
9.3.	Tubería con extremo opuesto abierto .....	72
9.4.	Diseño con rejillas de longitud variable.....	74
9.5.	Transiciones suavizadas (boca acampanada) .....	74
9.6.	Direccionadores de flujo en el interior del ducto.....	76
<b>10.</b>	<b>Análisis de resultados.....</b>	<b>82</b>
10.1.	Rejilla de 600 mm sin lama .....	84
10.2.	Comparativas (diferentes longitudes de rejilla) .....	89
10.2.1.	Torbellino en las simulaciones a 45°.....	95
10.3.	Tubería con extremo opuesto abierto .....	100
10.3.1.	Rejilla de 200 mm .....	100
10.3.2.	Rejilla de 800 mm .....	102
10.4.	Diseño con rejillas de longitud variable.....	104
10.4.1.	Simulación inicial.....	104
10.4.2.	Adición de ramales.....	108
10.4.3.	Ramales redondeados.....	112





10.4.4.	Ramales redondeados perfeccionados .....	118
10.5.	Diseño con transición suavizada (boca acampanada).....	126
10.6.	Elementos direccionadores .....	133
10.7.	Aspectos ergonómicos.....	140
<b>11.</b>	<b>Metodología seguida en el desarrollo del trabajo .....</b>	<b>144</b>
11.1.	Descripción de las fases y tareas.....	144
11.2.	Diagrama de Gantt.....	148
<b>12.</b>	<b>Aspectos económicos .....</b>	<b>150</b>
<b>13.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>152</b>
<b>14.</b>	<b>Líneas futuras de investigación .....</b>	<b>154</b>
<b>15.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>158</b>



## Lista de tablas

Tabla 1: Olores de compuestos presentes en instalaciones depuradoras.....	5
Tabla 2: Tabla de hitos.....	148
Tabla 3: Costes de recursos humanos del proyecto.....	150
Tabla 4: Costes de amortización del proyecto.....	150
Tabla 5: Presupuesto final del proyecto.....	151

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Municipios que conforman el CABB [3].....	2
Ilustración 2: Cubierta de espesador de fango en la EDAR de Galindo [8].....	7
Ilustración 3: Flotador cubierto en la EDAR de Galindo [8].....	8
Ilustración 4: Curvas isodoras en las cercanías de la EDAR de Galindo (estado actual y objetivo principal de izquierda a derecha) [9].....	8
Ilustración 5: Esquema de un sistema de ventilación por impulsión [10].....	11
Ilustración 6: Esquema de un sistema de ventilación por extracción [10].....	11
Ilustración 7: Esquema de un sistema de ventilación por impulsión-extracción [10].....	12
Ilustración 8: Ventilador centrífugo tipo [11].....	14
Ilustración 9: Diseños de álabes para ventiladores centrífugos [11].....	14
Ilustración 10: Rodete de un ventilador centrífugo de pala radial [11].....	15
Ilustración 11: Rodete de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia delante [11].....	16
Ilustración 12: Rodete de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás [11].....	17
Ilustración 13: Ventilador helicoidal [11].....	18
Ilustración 14: Ventilador tubular [11].....	19
Ilustración 15: Efecto de la orientación de las lamas en la difusión del aire [10].....	20
Ilustración 16: Variedad de diseños de difusores de techo [12].....	21
Ilustración 17: Difusión de aire mediante vena radial [13].....	22
Ilustración 18: Toberas de ventilación orientables [14].....	22



Ilustración 19: Velocidades del aire para el sistema de flujo pistón en el edificio de recepción de residuos líquidos (EDAR de Galindo) [15].....	24
Ilustración 20: Distorsión de la velocidad a lo largo de una rejilla instalada en el lateral de un conducto [2].....	25
Ilustración 21: Líneas de corriente en las tuberías y rejillas de impulsión.....	26
Ilustración 22: Campo de velocidades en las tuberías y rejillas de impulsión .....	27
Ilustración 23: Disposición de las rejillas en el artículo [16].....	28
Ilustración 24: Distribución de velocidades en el artículo [16].....	29
Ilustración 25: Esquema de medición de tipos de presión en un conducto de ventilación [20] .....	34
Ilustración 26: Relación de CFD con otras ramas de la ciencia [22].....	36
Ilustración 27: Ejemplo de discretización por el método de volúmenes finitos [23].....	38
Ilustración 28: Resolución y modelización de la turbulencia según el método de resolución [28] .....	46
Ilustración 29: Ejemplo de resultados extraídos para el caso de una esfera contrapuesta a un flujo turbulento [29].....	46
Ilustración 30: Velocidad de una partícula en función del tiempo en régimen turbulento [26].....	48
Ilustración 31: Geometría de una rejilla tras importación y tras reparación, de izquierda a derecha .....	54
Ilustración 32: Volumen fluido de una rejilla (vista transparente) .....	55
Ilustración 33: Geometría representativa del aire de la estancia .....	56
Ilustración 34: Ejemplo de diseño final del sistema de impulsión .....	56
Ilustración 35: Detalles del mallado (capas límite y refinamiento de la malla).....	58
Ilustración 36: Ejemplo del mallado final (diseño con ramales redondeados) .....	58
Ilustración 37: Modelos físicos seleccionados.....	59
Ilustración 38: Ejemplo de condiciones de contorno impuestas.....	62
Ilustración 39: Conjunto de escenas creadas.....	63
Ilustración 40: Geometría del tipo de rejilla .....	64
Ilustración 41: Disposición general de la geometría.....	65
Ilustración 42: Condiciones de contorno sobre geometría .....	66
Ilustración 43: Disposición de las rejillas de 600 mm de longitud (vista en planta).....	67
Ilustración 44: Disposición de las rejillas de 200 mm de longitud (vista en planta).....	67



Ilustración 45: Disposición de las rejillas de 800 mm de longitud (vista en planta).....	68
Ilustración 46: Detalle de la posición de la lama (posición horizontal).....	69
Ilustración 47: Detalle de la posición de la lama (posición 45°).....	69
Ilustración 48: Vista general del mallado.....	70
Ilustración 49: Detalle del mallado más fino en las rejillas.....	71
Ilustración 50: Detalle de las capas límite en la tubería.....	71
Ilustración 51: Geometría y ubicación de la condición de contorno de salida. Caso de tubería abierta (longitud de 200 mm).....	72
Ilustración 52: Condición de contorno de salida impuesta (longitud de 200 mm).....	73
Ilustración 53: Geometría y ubicación de la condición de contorno de salida. Caso de tubería abierta (longitud de 800 mm).....	73
Ilustración 54: Condición de contorno de salida impuesta (longitud de 800 mm).....	73
Ilustración 55: Vista interior de la conexión conducto-rejilla del prototipo proporcionado por el CABB.....	75
Ilustración 56: Coeficiente de pérdidas de carga para diferentes conexiones [33].....	75
Ilustración 57: Trayectoria del aire en conducto rectangular con y sin deflectores [34].....	77
Ilustración 58: Ejemplo de instalación de deflectores.....	77
Ilustración 59: Empleo incorrecto de deflectores en ramales o aberturas [34].....	78
Ilustración 60: Sección del deflector propuesto.....	78
Ilustración 61: Emplazamiento del deflector (resaltado en rosa).....	79
Ilustración 62: Ejemplo de geometría de la malla perforada.....	80
Ilustración 63: Geometría representativa de la malla perforada (disco).....	81
Ilustración 64: Geometría representativa de la malla perforada (disco parcial).....	81
Ilustración 65: Plano central auxiliar para visualizar resultados.....	82
Ilustración 66: Sección auxiliar de la rejilla 2 para visualizar resultados.....	83
Ilustración 67: Campo de velocidades con la rejilla de 600 mm sin lama.....	84
Ilustración 68: Vectores de velocidad con la rejilla de 600 mm sin lama.....	85
Ilustración 69: Trayectoria del flujo de aire (vista en planta).....	86
Ilustración 70: Trayectoria del flujo de aire (vista en perfil).....	86
Ilustración 71: Campo de presiones (rejilla de 600 mm sin lama).....	87
Ilustración 72: Sección transversal de una rejilla (velocidades).....	88
Ilustración 73: Campos de velocidades con lama horizontal.....	89



Ilustración 74: Vectores de velocidad en la rejilla 1 con lama horizontal.....	90
Ilustración 75: Campos de presiones con lama horizontal.....	91
Ilustración 76: Vista lateral de la dirección de salida del flujo de aire.....	92
Ilustración 77: Vista en planta de la dirección de salida del flujo de aire.....	92
Ilustración 78: Distribución de velocidad en la sección de una rejilla con lama a diferentes posiciones.....	93
Ilustración 79: Vectores de velocidad en la rejilla 1 con lama a 45°.....	94
Ilustración 80: Planos auxiliares en la rejilla 1 con sus respectivos vectores de velocidad.....	95
Ilustración 81: Vectores de velocidad en la rejilla 1 (detalle del plano 2).....	96
Ilustración 82: Vectores de velocidad en la rejilla 1 (detalle del plano 3).....	97
Ilustración 83: Vectores de velocidad en la rejilla 1 (detalle del plano 4).....	97
Ilustración 84: Vectores de velocidad de la rejilla 1 (vista frontal del plano 5).....	98
Ilustración 85: Vectores de velocidad de la rejilla 1 (detalle del plano 5).....	99
Ilustración 86: Campo de velocidades con la tubería abierta (rejilla de 200 mm).....	100
Ilustración 87: Campo de presiones con la tubería abierta (rejilla de 200 mm).....	101
Ilustración 88: Campo de velocidades con la tubería abierta (rejilla de 800 mm).....	102
Ilustración 89: Campo de presiones con la tubería abierta (rejilla de 800 mm).....	103
Ilustración 90: Geometría y distribución de las rejillas en el diseño con longitudes variables.....	104
Ilustración 91: Campo de velocidades en el diseño con longitudes variables.....	105
Ilustración 92: Campo de presiones en el diseño con longitudes variables.....	106
Ilustración 93: Líneas de corriente en el diseño con longitudes variables.....	107
Ilustración 94: Geometría y distribución de las rejillas en el diseño con ramales angulares.....	108
Ilustración 95: Campo de velocidades en el diseño con ramales angulares.....	109
Ilustración 96: Campo de presiones en el diseño con ramales angulares.....	110
Ilustración 97: Vectores de velocidad en la última rejilla en el diseño con ramales angulares.....	111
Ilustración 98: Geometría y distribución de rejillas en el diseño con ramales redondeados.....	112
Ilustración 99: Campo de velocidades en el diseño con ramales redondeados.....	113



Ilustración 100: Campo de presiones en el diseño con ramales redondeados.....	114
Ilustración 101: Streamlines en el diseño con ramales redondeados.....	115
Ilustración 102: Ampliación de las streamlines en la primera rejilla .....	116
Ilustración 103: Vectores de velocidad en la primera rejilla en el diseño con ramales redondeados.....	117
Ilustración 104: Suavizado de la curva derecha de las primeras rejillas.....	118
Ilustración 105: Resultado tras el suavizado en las primeras rejillas.....	119
Ilustración 106: Geometría y distribución de las rejillas en el diseño con ramales perfeccionados .....	120
Ilustración 107: Campo de velocidades en el diseño con ramales perfeccionados.....	121
Ilustración 108: Campo de presiones en el diseño con ramales perfeccionados .....	122
Ilustración 109: Streamlines en el diseño con ramales perfeccionados.....	123
Ilustración 110: Vectores de velocidad en la primera rejilla en el diseño con ramales perfeccionados .....	124
Ilustración 111: Detalle de la sección transversal conexión-rejilla 3 .....	125
Ilustración 112: Redondeo de la boca de conexión conducto-rejilla .....	126
Ilustración 113: Vista en planta de la geometría de la rejilla 1 (longitudes de 200 y 800 mm de izquierda a derecha) .....	127
Ilustración 114: Velocidad en la sección transversal conducto-rejilla (longitud de 200 mm) .....	127
Ilustración 115: Comparativa de velocidades en la sección transversal conducto-rejilla (longitud de 200 mm) .....	128
Ilustración 116: Campo de velocidades con la tubería abierta y boca acampanada (rejilla de 200 mm) .....	129
Ilustración 117: Campo de velocidades con la tubería abierta y boca acampanada (rejilla de 800 mm) .....	130
Ilustración 118: Streamlines con la tubería abierta y boca acampanada (presión mal impuesta) .....	131
Ilustración 119: Vectores de velocidad con la tubería abierta y boca acampanada (presión mal impuesta) .....	132
Ilustración 120: Campo de velocidades para el caso del deflector.....	133
Ilustración 121: Núcleos de vórtices para el caso del deflector .....	134
Ilustración 122: Campo de velocidades para el caso de la malla perforada (disco).....	135



Ilustración 123: Campo de presiones para el caso de la malla perforada (disco) .....	136
Ilustración 124: Campo de velocidades para el caso de la malla perforada (disco parcial) .....	137
Ilustración 125: Campo de presiones para el caso de la malla perforada (disco parcial) .....	138
Ilustración 126: Líneas de corriente para el caso de la malla perforada (disco parcial)	139
Ilustración 127: Campo de velocidades (velocidad de entrada de 5 y 10 m/s de arriba a abajo) .....	141
Ilustración 128: Representación gráfica de un conducto a altura media con operario .....	142
Ilustración 129: Campo de velocidades (longitudes de ramales de 20 y 30 cm de arriba a abajo).....	143
Ilustración 130: Diagrama de Gantt.....	149
Ilustración 131: Geometría representativa del modelo con ramales y reducción de sección.....	154
Ilustración 132: Líneas de corriente del modelo con ramales y reducción de sección	155
Ilustración 133: Escalar de velocidades del modelo con ramales y reducción de sección .....	156



## Lista de acrónimos

<b>BCAM</b>	Basque Center for Applied Mathematics
<b>CABB</b>	Consortio de Aguas Bilbao Bizkaia
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>DNS</b>	Direct Numerical Simulation
<b>EDAR</b>	Estación Depuradora de Aguas Residuales
<b>EIB</b>	Escuela de Ingeniería de Bilbao
<b>ESGI</b>	European Study Groups with Industry
<b>HPC</b>	High Performance Computing
<b>IVA</b>	Impuesto sobre el Valor Añadido
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>LES</b>	Large Eddy Simulation
<b>MAL</b>	Master Amaierako Lana
<b>RANS</b>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations
<b>SI</b>	Sistema Internacional
<b>TFM</b>	Trabajo Fin de Máster
<b>UNE</b>	Una Norma Española
<b>UOE</b>	Unidad de concentración de Olor Europeo





## 1. Introducción

En los últimos años ha adquirido gran importancia el implantar técnicas y procesos de desodorización, más aún en instalaciones industriales en los que la calidad del aire y la salubridad de los entornos son de vital relevancia.

Actualmente la mayoría de Estaciones de Depuración de Aguas Residuales (EDAR) se diseñan con sistemas de eliminación de olores de cara a minimizar el impacto ambiental en el entorno. Al mismo tiempo, numerosas depuradoras y estaciones de bombeo que no contaban con sistemas de desodorización se han visto obligadas a instalarla, debido a la expansión urbanística o a quejas vecinales [1]. No obstante, el diseño y funcionamiento de estos sistemas debe ser óptimo como conjunto, no siendo suficiente la elección adecuada de los elementos impulsores. Componentes como los conductos y elementos terminales influyen sobremanera en la explotación de estos, produciendo desvíos en los flujos aéreos de salida que comprometen la efectividad de la ventilación en las instalaciones.

Sin embargo, el estudio y análisis de sistemas de ventilación conlleva una serie de complejidades en sus cálculos, resultando su resolución manual inviable. Es por ello que para este propósito se hace uso de una herramienta en auge como la mecánica de fluidos computacional (CFD), que permite obtener resultados veraces para un amplio rango de situaciones mediante simulación iterativa. Esta herramienta se emplea para realizar el análisis fluidodinámico de las rejillas impulsoras en instalaciones de desodorización del Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia (CABB) a fin de estudiar su eficiencia y margen de mejora, para lo que se examinan diversos diseños y disposiciones de las mismas.

Una configuración óptima del sistema de impulsión maximizará la homogeneización del flujo de aire en el recinto reduciendo el coste de explotación del mismo. Se proponen a lo largo de este trabajo alternativas a los diseños de rejillas actualmente instalados, los cuales según estudios previos (*“Challenge No. 5-Optimal design of ventilation grates through CFD simulations”* [2]) muestran deficiencias a la hora de dirigir la salida del fluido de forma perpendicular, compuestas por diversas longitudes, ángulos de salida o adición de elementos adicionales. Se busca extraer tendencias extrapolables a una gama de instalaciones de desodorización de la entidad en cuestión (CABB).

## 2. Contexto

### 2.1. Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia

El Consorcio de Aguas es la entidad responsable de la gestión en red primaria, tanto del abastecimiento de agua potable como del saneamiento de las aguas residuales de, aproximadamente, un millón de habitantes de Bizkaia.

Está integrado por ochenta y un municipios, además de por la Diputación Foral de Bizkaia y el Gobierno Vasco, sin perjuicio de mantener convenios de colaboración con distintas entidades locales [3].



Ilustración 1: Municipios que conforman el CABB [3]

El 17 de marzo de 1967, diecinueve municipios de Bizkaia y la hoy desaparecida Corporación Administrativa Gran Bilbao constituyeron un Consorcio para la instalación y gestión de los servicios de abastecimiento de agua y saneamiento en red primaria. En dicha fecha se aprobaron los Estatutos de la entidad creada, los cuales regulaban su régimen orgánico, funcional y financiero.

Desde la citada fecha se han producido importantes modificaciones de los Estatutos, que han venido determinadas tanto por su necesaria adaptación a las nuevas normas legales aprobadas, como por la ampliación de sus miembros y de los servicios prestados, tales como la gestión de las redes locales de suministro de agua.

Desde el punto de vista geográfico, se ha producido sucesivamente la incorporación de áreas tales como Uribe-Kosta, Arratia, Durangoaldea,



Encartaciones y Lea-Artibai, de tal modo que en la actualidad el Consorcio lo integran 81 municipios, con una población de más del millón de habitantes, lo que representa el 91,26 % en Bizkaia y el 48,20 % dentro de la Comunidad Autónoma del País Vasco.

En su ámbito territorial se encuentran las zonas de mayor concentración urbana e industrial del Territorio Histórico de Bizkaia [4].

Esta entidad ejerce una serie de competencias específicas con sus correspondientes funciones, entre las cuales se encuentran el abastecimiento de agua en red primaria, saneamiento en red primaria o control de vertidos industriales. El ámbito del abastecimiento comprende las funciones de captación o alumbramiento, embalse, transporte, tratamiento y conducción hasta grandes usuarios finales o hasta los depósitos cabecera de la red de distribución. Por otro lado, el saneamiento engloba los colectores e interceptores generales (que conectan el alcantarillado con las estaciones depuradoras de aguas residuales), las estaciones depuradoras (con todas sus instalaciones anejas de tratamiento y eliminación de residuos), y los emisarios (que devuelven el agua depurada al medio acuático receptor). Por último, el control de vertidos industriales abarca la autorización, seguimiento, control e inspección de los vertidos de aguas residuales, tanto a la red primaria de saneamiento como a la de alcantarillado, así como la facultad sancionadora de las infracciones que se produzcan, incluida la clausura, en su caso, de vertidos abusivos, o la declaración de nulidad del contrato de suministro de agua correspondiente [5].



## 2.2. Desodorización

En estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), se produce un fuerte impacto odorífero al generarse olores provocados por los diversos contaminantes procedentes de las aguas residuales. Ya sea por los gases disueltos en las aguas, o por transformaciones propias de los procesos de tratamiento, su efecto en la salud y su necesidad de reducir el impacto en las zonas de trabajo, así como en las zonas colindantes son prioridades de estas estaciones. Es por ello que se suelen realizar una serie de operaciones con el fin de paliar estos efectos:

- Confinamiento de las zonas productoras de olor mediante la cobertura de las láminas de agua, a la vez que se edifica una estructura que contenga al mismo. En este proceso, una serie de tratamientos o zonas suelen ir en edificio, como lo son las obras de llegada, zonas anaerobias del tratamiento biológico, espesadores de fangos o tratamiento de fangos primarios, entre otros.
- Extracción del aire contaminado mediante el sistema de ventilación. Generalmente, favoreciendo una depresión en el interior de la estancia para evitar la fuga del aire a tratar. Una vez extraído y renovado el aire del edificio se traslada el aire viciado para su pertinente tratamiento en la zona designada.
- Eliminación del aire viciado con el tratamiento oportuno. Los más habituales son la desodorización por vía química, carbón activo y biológica.
- Dispersión del aire tratado al exterior por chimeneas, dada la imposibilidad de alcanzar un 100% de eficacia con los tratamientos realizados. Diluyendo el aire se obtiene una reducción del impacto odorífero.

A continuación, se exponen los principales compuestos olorosos presentes en este tipo de instalaciones y su correspondiente olor:

*Tabla 1: Olores de compuestos presentes en instalaciones depuradoras*

Compuesto oloroso	Tipo de olor
Aminas	Pescado
Amoniaco	Amoniacal
Diaminas	Carne descompuesta
Sulfuro de hidrógeno	Huevos podridos
Mercaptanos	Coles descompuestas
Sulfuros orgánicos	Coles podridas
Escatol	Materia fecal

De forma adicional, y con independencia al nivel de olores determinado para cada zona, es necesario monitorizar los niveles de SH<sub>2</sub> y de oxígeno en zonas accesibles para personal operador y designada como confinada. La presencia de estos compuestos, además, precisa que las conducciones en esta índole de edificios se realicen en su mayoría en materiales plásticos, dada su resistencia a la corrosión por contaminantes derivados de los sulfuros. El más utilizado es el polipropileno, puesto que ofrece mayor comodidad al permitir efectuar uniones soldadas.

Atendiendo al nivel olfatométrico, se catalogan las diferentes zonas de la EDAR con objeto de concretar las condiciones exigibles en las mismas. Se determinan asimismo las zonas a tratar, al igual que las condiciones a las que se deben mantener las mismas; es decir, mantener una depresión en zonas muy contaminadas para eludir la perversión del aire de zonas limpias.

Dicha calidad del aire, así como su cuantificación, se especifica en la norma UNE-EN-13725 "Calidad del aire. Determinación de la concentración de olor por olfatometría dinámica". Esta tiene como propósito legislar las tomas de muestras, cuantificación de la concentración de olor y cálculo de la emisión de olor de los focos. Adicionalmente, se establece la unidad de concentración de olor europeo por metro cúbico (UOE/m<sup>3</sup>) como aquella sustancia o mezcla de sustancias que diluida en 1 m<sup>3</sup> de gas neutro en condiciones normales, es distinguida de aire exento de olor por el 50 % de los panelistas.

La clasificación la conforman los siguientes grupos:

- Zonas altamente contaminadas sin acceso de personal
- Zonas contaminadas con acceso de personal
- Zonas a mantener sin contaminación

Las primeras corresponden a las zonas en las que no se prevé la presencia de personal y que contienen un alto índice de contaminación. En ellas se recomienda un sistema de ventilación que garantice unas condiciones aceptables para la realización de cualquier actividad, no superando un valor de 50000 UOE/m<sup>3</sup> [6].

Las segundas coinciden con las zonas en las que se prevé presencia de personal y un nivel de contaminación alto, por lo que se ha de ser más exigente en el nivel de calidad del aire para garantizar la salubridad del entorno de trabajo. Se recomienda, por ello, que no se supere las 5000 UOE/m<sup>3</sup>, reduciendo este límite a 1000 UOE/m<sup>3</sup> si la presencia del personal es constante (80% de la jornada laboral) [6].

Las últimas, por el contrario, se definen como las zonas que, debido a la presencia de personal administrativo o equipamiento susceptible de daño, son deseables mantener libres de contaminación. Para ese propósito, se mantiene una sobrepresión en estas estancias para evitar el contagio proveniente de zonas contaminadas. Consecuentemente, el aire de estas zonas no recibe tratamiento, pues se estima que no contiene elementos potencialmente contaminantes.

### 2.3. Iniciativas del CABB en desodorización

El Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia gestiona un total de 32 depuradoras, siendo la depuradora de Galindo ubicada en Sestao la de mayor relevancia de todo el sistema. Pues es esta la principal instalación de tratamiento de aguas residuales de Bizkaia, saneando a diario los vertidos de una población superior al millón de habitantes. En la última década, se han destinado más de 12 millones de euros buscando reducir los diversos impactos de la misma instalación, entre los que predominan el visual y el odorífero [7]. Con dicho fin se han llevado a cabo



actividades de integración paisajística (aumento de la masa vegetal plantando árboles, diseños con menor impacto visual como el horno de valorización de lodos...) así como aquellas que buscan paliar las molestias por olor que produce la EDAR de Galindo a la cifra aproximada de 25000 vecinos de los municipios cercanos, encabezados por Sestao, próximo a la instalación.

La extensa área de agua ubicada en el exterior y sin cobertura alguna de edificación, contrastaba con el reducido valor de las superficies cobijadas o confinadas (77000 m<sup>2</sup> frente a 12000 m<sup>2</sup>, respectivamente para el año 2016 [8]). Fruto del cambio de mentalidad desde la puesta en marcha de la instalación, son requeridos cambios estructurales en la obra civil para evitar la propagación del olor producido por los diferentes tratamientos. Este esfuerzo ingenieril supone un gasto más elevado que el que hubiera sido necesario de haber previsto estas especificaciones en la fase de diseño inicial; mas minimizan, no solo la afección odorífera, sino también el efecto visual y el consumo energético, además de mejorar las condiciones de trabajadores y vecinos de la zona.

Como se ha mencionado con anterioridad, el confinamiento de los principales focos emisores de olor es el primer paso, para después poder tratar el aire de la estancia y verter un aire más limpio al exterior. Entre los esfuerzos llevados a cabo, son remarcables las cubiertas de espesadores de fangos (Ilustración 2) y flotadores (Ilustración 3), sumándose a estos el proyecto más reciente llevado a cabo en el reactor biológico. En él se trata una superficie de balsas de 25400 m<sup>2</sup>, responsables del 6,3% del olor emitido por la EDAR [7].



*Ilustración 2: Cubierta de espesador de fango en la EDAR de Galindo [8]*



*Ilustración 3: Flotador cubierto en la EDAR de Galindo [8]*

Como se observa en la siguiente ilustración (Ilustración 4), los esfuerzos se centran en delimitar el alcance de las curvas isodoras hasta el perímetro de la parcela de la EDAR, minimizando el efecto en la población.



*Ilustración 4: Curvas isodoras en las cercanías de la EDAR de Galindo (estado actual y objetivo principal de izquierda a derecha) [9]*





## 2.4. Ventilación

La ventilación se define como el proceso de reemplazar o renovar el aire viciado de los espacios o recintos cerrados y habitados por aire limpio con el fin de obtener unas condiciones de habitabilidad óptimas en el interior de los mismos. Esta acción mejora las condiciones del entorno, como pueden ser la temperatura o la humedad, refrescando el ambiente e impidiendo que compuestos dañinos para el organismo queden suspendidos por un tiempo prolongado en zonas habitables, además de aportar el oxígeno necesario para la subsistencia. Asimismo, en instalaciones industriales la ventilación contribuye a la refrigeración de maquinaria, aporte de aire para procesos de combustión y dispersión de compuestos tóxicos o peligrosos para la salud del personal.

La sensación de confort que proporciona esta acción varía en función de diversas variables. La velocidad es una de las más destacables y básicas, ya que una velocidad elevada en un espacio habitado provocaría una sensación de incomodidad inaceptable en una instalación de ventilación. Es por ello que se establecen unos límites para esta variable, tanto superior, para evitar el efecto mencionado, como inferior, pues el aire en reposo no es cómodo. Este rango variará en función del entorno y las actividades que se lleven a cabo en el mismo; por lo que se permitirán velocidades superiores en instalaciones industriales sin personal que en zonas de oficinas, por ejemplo.

En cuanto al modo en el que se genera el movimiento del aire que da como resultado la ventilación del habitáculo o zona en cuestión, se diferencian principalmente dos métodos: la ventilación natural y la ventilación mecánica o forzada.

### 2.4.1. Ventilación natural

La ventilación natural se caracteriza por ser aquella que se produce por una diferencia de presión, cuyo origen puede ser bien térmico bien eólico. No se requiere de maquinaria adicional para provocar ese movimiento; el gradiente de temperatura o el flujo de viento impulsa el aire al interior y extrae desde el interior a través de ventanas u orificios ubicados en la envolvente del edificio. El primordial defecto de dicho sistema es la dificultad de regulación del caudal de renovación, lo que podría suponer un problema a la hora de cumplir unos requisitos mínimos de salubridad.

## 2.4.2. Ventilación forzada o mecánica

La ventilación forzada, por otro lado, se define como aquella llevada a cabo por medios mecánicos. Entre sus ventajas destacan la alta efectividad, junto con un elevado grado de control sobre los caudales de ventilación y la posibilidad de efectuar tratamientos personalizados o ventilaciones localizadas. No obstante, el consumo energético es superior a la anterior estrategia por la utilización de equipos mecánicos para impulsar o extraer el aire, los cuales, además precisan de operaciones de mantenimiento para asegurar su correcto funcionamiento. Este consumo conlleva que esta no sea una estrategia comúnmente escogida para locales de uso muy intermitente (viviendas, por ejemplo).

La ventilación forzada, a su vez, se puede clasificar en tres grupos atendiendo a la configuración de los equipos mecánicos que provocan la diferencia de presión. Así pues, se diferencian las siguientes formas de ventilación mecánica:

- Ventilación por impulsión
- Ventilación por extracción
- Ventilación por impulsión-extracción

### 2.4.2.1. Ventilación por impulsión

En ella la entrada de aire se efectúa por medios mecánicos (ventilador de impulsión) creando una sobrepresión en el interior que expulsa el aire por elementos permeables posteriormente.

Dicha estrategia es particularmente efectiva cuando el aire atmosférico se encuentre sensiblemente contaminado debido a la posibilidad de añadir filtros en la admisión.

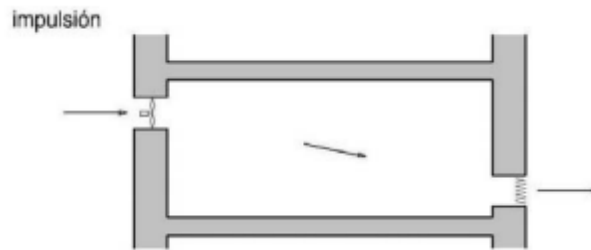


Ilustración 5: Esquema de un sistema de ventilación por impulsión [10]

#### 2.4.2.2. Ventilación por extracción

Actúa por causa de la depresión formada en el local por un extractor mecánico. El contraste de la baja presión en el interior con la atmosférica del exterior (superior a esta) genera un movimiento que introduce aire fresco por las aberturas del edificio, y expulsa el aire viciado del interior de la estancia.

Su utilización se recomienda para situaciones en las que se requiera que el local se mantenga en depresión con respecto a las instalaciones contiguas (aseos, laboratorios, cocinas industriales, etc.). Los locales donde se detecten focos fijos de contaminantes son susceptibles a utilizar esta estrategia; son destacables los garajes en los que el monóxido de carbono generado debe ser expulsado con inmediatez dada su toxicidad.

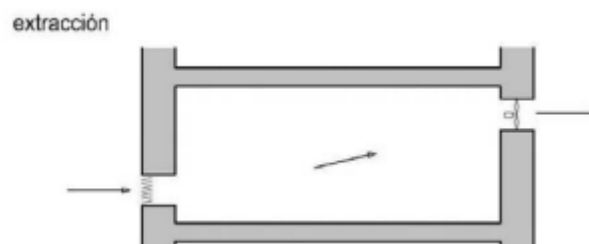


Ilustración 6: Esquema de un sistema de ventilación por extracción [10]

### 2.4.2.3. Ventilación por impulsión-extracción

El empleo de este mecanismo implica ambas, introducción y extracción efectuadas mecánicamente.

Se trata del sistema más completo con la capacidad de realizar un barrido perfecto en el local, idóneo para situaciones en las que se requiera mantener en depresión o sobrepresión un integrante de un grupo de edificios o estancias.

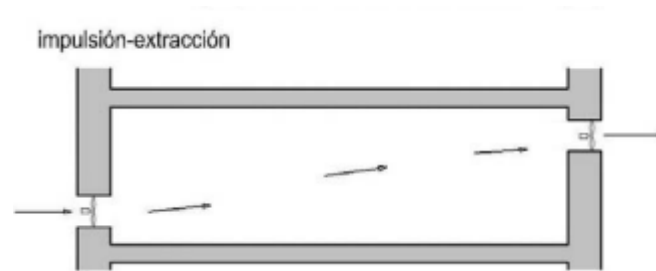


Ilustración 7: Esquema de un sistema de ventilación por impulsión-extracción [10]



## 2.5. Ventiladores

Se define como ventilador a la turbo-máquina encargada de transmitir energía para generar la presión necesaria con la que mantener un flujo continuo de aire; o, dicho de otra manera, una máquina rotativa capaz de poner en movimiento una determinada masa de aire a la que comunicar una presión con la finalidad de mover un flujo gaseoso.

Por otro lado, se denominan ventiladores industriales a aquellos destinados a realizar operaciones de ventilación o movimiento de gases bajo condiciones severas de operación, tales como altas temperaturas o presiones, presencia de partículas o funcionamiento con gases tóxicos, corrosivos o explosivos.

La clasificación de los ventiladores puede ser dispar obedeciendo al criterio seleccionado. Sin embargo, el principal criterio de clasificación habitual se basa en la trayectoria del aire, por lo que se diferencian los siguientes tipos de ventilador:

- Ventiladores centrífugos
- Ventiladores axiales

## 2.5.1. Ventiladores centrífugos

Estos propulsores se caracterizan por tener una entrada de aire axial y una salida del mismo radial en el sentido de giro del rodete. El rotor gira dentro de una carcasa en forma de caracol que dirige el aire hacia su salida, convirtiendo así la presión estática en presión dinámica.

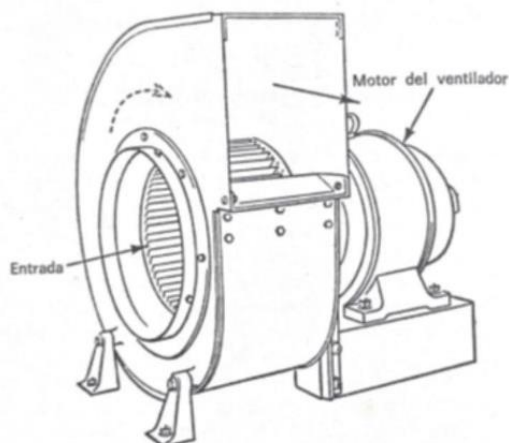


Fig. 15-2. Ventilador centrífugo típico.

*Ilustración 8: Ventilador centrífugo tipo [11]*

El tipo de rodete utilizado determina el subgrupo al que pertenece el ventilador centrífugo en cuestión.



Fig. 15-3. Diferentes modelos de álabes para ventilador centrífugo.

*Ilustración 9: Diseños de álabes para ventiladores centrífugos [11]*

### 2.5.1.1. Ventiladores centrífugos con rodete de pala radial

Formado por un rodete de palas rectas alineadas según el centro del mismo, son los ventiladores centrífugos menos utilizados dadas las pobres prestaciones que presentan en cuanto a rendimiento e impacto acústico. No obstante, la forma de las palas impide la adherencia de materiales granulares o pulverulentos durante su trasiego, cualidad de especial relevancia en ambientes cargados de polvo.

Fig. 15-4. Rueda de paletas.

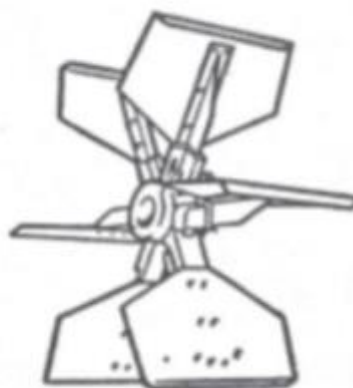


Ilustración 10: Rodete de un ventilador centrífugo de pala radial [11]

### 2.5.1.2. Ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia adelante

También denominados ventiladores centrífugos de álabes adelantados (forward), poseen un número elevado de álabes con curvatura cóncava en sentido de la rotación de poca anchura. Esta característica los dota de una mayor velocidad de salida, por lo que trasiega un caudal superior para un diámetro y velocidad de rotación dadas. Su uso es habitual en edificios residenciales o comerciales en modo de ventiladores de tamaño pequeño o medio, en los que el ruido es un factor primordial.



Fig. 15-6. Rueda con álabes curvados hacia adelante.

*Ilustración 11: Rodete de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia delante [11]*

### 2.5.1.3. Ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás

Como el propio nombre indica, las palas de estos ventiladores poseen una curvatura en el sentido opuesto al giro del rodete. De este modo, el lado convexo de los álabes quedaría en el sentido de la rotación, obteniendo también el nombre de pala atrasada (backward). Una menor cantidad de álabes de mayor anchura favorece el flujo de aire a través de ellos, reduciendo las pérdidas por remolinos o el choque producido al impactar con estos elementos.



Es por ello que, la alta eficiencia de estos los convierte en los candidatos idóneos para altas potencias. La capacidad auto limpiante de las palas les confiere una mayor versatilidad al poder utilizarlos también en ambientes con polvo. Son el tipo de ventilador centrífugo más utilizado, al emplearse en una gran variedad de usos.

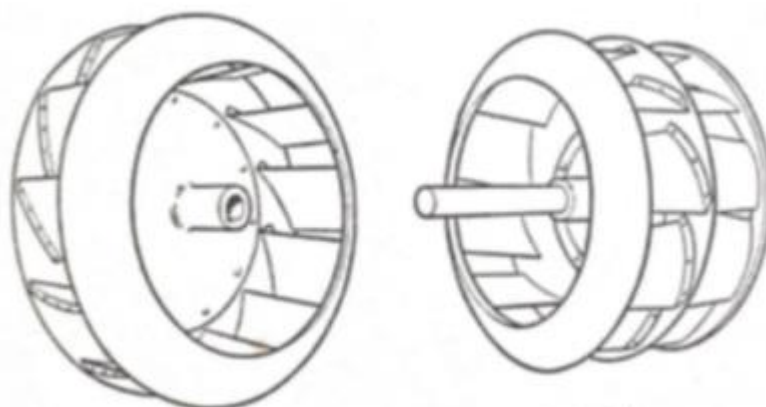


Fig. 15-8. Rueda con álabes curvados hacia atrás.

*Ilustración 12: Rodete de un ventilador centrífugo de álabes curvados hacia atrás [11]*

## 2.5.2. Ventiladores axiales

La entrada, así como la salida, se realiza de forma paralela al eje de rotación de estas máquinas propulsoras. Son adecuadas para mover altos caudales de aire a bajas presiones. Según su envolvente, se distinguen dos clases de ventiladores axiales: los helicoidales y los tubulares.

### 2.5.2.1. Ventiladores helicoidales

Designados con frecuencia como ventiladores murales, su función habitual es la de impulsor o extractor en naves industriales. Se trata de máquinas capaces de mover un alto caudal de aire a baja presión, generalmente en el supuesto de que no haya conducciones o que la longitud de estas sea muy reducida.

Se trata por tanto de una alternativa económica para obtener grandes caudales en situaciones en las que no se requiera vencer una alta resistencia al flujo de aire. La forma de las palas determinará la cantidad de aire trasegada, por lo que un ventilador con las palas curvadas conseguirá más caudal y será más silencioso que uno cuyas palas sean rectas. La utilización de álabes estrechos y rectos provoca un aumento de turbulencia y vibraciones, que dan como resultado un mayor efecto acústico.

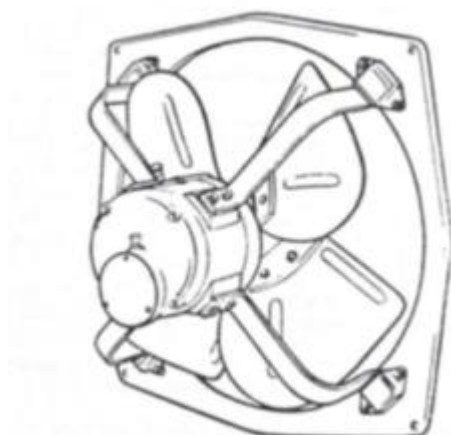


Fig. 15-12. Ventilador helicoidal, montado sobre anillo.

*Ilustración 13: Ventilador helicoidal [11]*

### 2.5.2.2. Ventiladores tubulares

Se componen de una hélice de álabes generalmente orientables en forma de ala de avión que rotan dentro de una carcasa cilíndrica. Poseen la capacidad de vencer resistencias moderadas, por lo que se favorece su intercalación en conductos tubulares.

La simplicidad de instalación, su reducido tamaño y elevado rendimiento han provocado un aumento significativo en el empleo de ventiladores axiales. El rendimiento proporcionado por los ventiladores tubulares, en concreto, asciende a un total de hasta 90%; además de eludir complejas conexiones en las conducciones como en el caso de los ventiladores centrífugos, en los que se requieren cambios de dirección de 90° en el flujo aéreo.

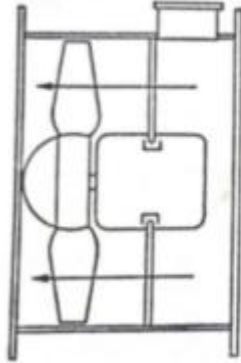


Fig. 15-17. Ventilador axial simple sin aletas directrices.

Ilustración 14: Ventilador tubular [11]

## 2.6. Elementos terminales de impulsión

Los elementos situados en los extremos del sistema de ventilación conforman este grupo. Los elementos terminales pueden estar instalados en impulsión o extracción, atendiendo a la función principal de los mismos, que puede versar entre admitir o extraer el aire que se empleará para la ventilación. En este apartado se presentan brevemente algunos elementos que pueden actuar como componentes del sistema de impulsión.

### 2.6.1. Rejillas

Las rejillas representan el sistema más simple para impulsar aire. Su principal funcionalidad se basa en proporcionar una distribución óptima del fluido para una correcta ventilación. Pudiendo localizarse en redes de conductos, poseen aletas o lamas horizontales y/o verticales para ayudar a direccionar el flujo de salida. Los diseños de estas láminas pueden variar en función del objetivo que se desee llevar a cabo, con lo que se consigue una difusión del aire diferente (ver Ilustración 15).

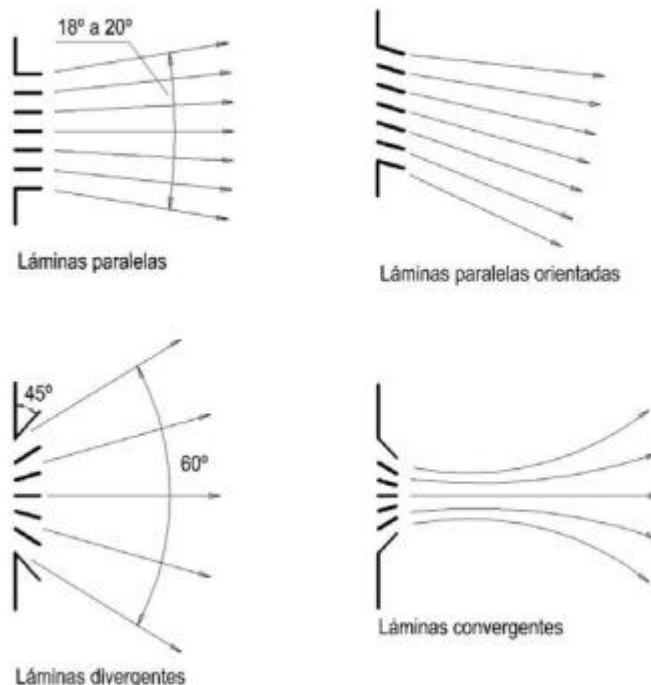


Ilustración 15: Efecto de la orientación de las lamas en la difusión del aire [10]

Ofrecen un largo alcance de la vena de aire impulsada, mas difícilmente pueden utilizarse en sistemas de caudal variable. Sus características las hacen idóneas para emplear en locales con condiciones de confort medias o no excesivamente exigentes debido a las altas velocidades. Ejemplos de estos recintos son naves o locales industriales, entre otros, en los que predomina el uso de estos elementos.

### 2.6.2. Difusores

Los difusores presentan un alcance inferior que las rejillas. Su diseño puede variar significativamente dando lugar a diversos modos de funcionamiento, pero siempre buscando cumplir un objetivo, que no es otro que la distribución de masas de aire dentro de las estancias. Esta distribución cumple a su vez funciones de impulsión y extracción de aire y mezcla de corrientes para conseguir unas condiciones aptas para la habitabilidad y el confort.

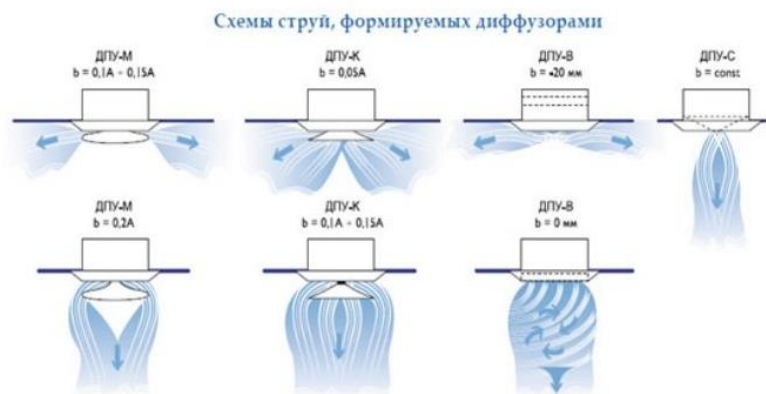


Ilustración 16: Variedad de diseños de difusores de techo [12]

Predominantemente localizadas en techos, también pueden situarse en paredes o suelos y presentan geometrías muy diferentes (rectangulares, circulares, lineales). Con las aletas o elementos orientadores que posean buscan una mayor mezcla de aire impulsada por lo general en forma de vena radial, aprovechando el efecto Coanda para adherirse al techo y reducir su velocidad al descender el aire por la estancia. Es el caso de los difusores circulares o rotacionales, estos últimos provocan un vórtice a su salida lo que facilita la mezcla; sin embargo, existen otros modelos de difusores como los lineales utilizados a menudo en techos por la discreción y escasa turbulencia que generan con sus aberturas largas.

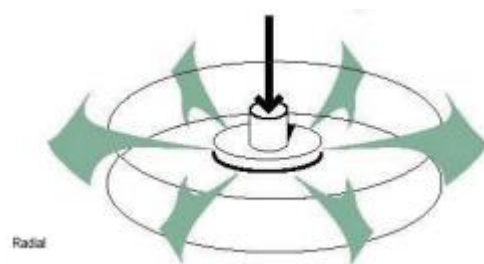


Ilustración 17: Difusión de aire mediante vena radial [13]

A menudo se ven dispositivos de este estilo en hospitales, gimnasios u otras instituciones municipales, entre otras, y con menor frecuencia, en edificios de apartamentos.

### 2.6.3. Toberas

Las toberas de ventilación o boquillas son una particularización de un tipo concreto de difusor. Sin embargo, su función es la de lanzar un chorro de aire a alta velocidad y de forma precisa, manteniendo su direccionalidad y pudiendo alcanzar largas distancias. El diseño de algunas permite ajustar el ángulo de salida o inclinación de la masa de aire.



Ilustración 18: Toberas de ventilación orientables [14]

Su presencia es habitual en grandes áreas como almacenes, centros comerciales o aeropuertos.

### 3. Objetivos y alcance del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es el análisis fluidodinámico a través de elementos de salida del sistema de impulsión mediante la realización de simulaciones detalladas de las rejillas de ventilación en sistemas de desodorización del CABB para estudiar la eficiencia y margen de mejora de las mismas. Dicho estudio se llevará a cabo mediante técnicas de CFD o mecánica de fluidos computacional.

Se busca por tanto encontrar un diseño de rejilla de impulsión óptima que cumpla los siguientes requisitos:

- Minimizar las pérdidas de carga generadas por el elemento en cuestión en la impulsión. De lo contrario, las pérdidas provocadas han de compensarse con el sistema de impulsión, aumentando el coste de funcionamiento del mismo.
- Maximizar la homogeneización del flujo de salida a lo largo de toda la sección longitudinal de la rejilla. En consecuencia, se reducirá el porcentaje del área de rejilla desaprovechado para impulsar aire al interior de la estancia, así como las turbulencias que puedan generarse.
- Lograr a la salida de la rejilla un flujo perpendicular con respecto al aire fluyente a través de la tubería en dirección axial. Este factor cobra especial relevancia si se trata de un sistema de ventilación tipo flujo pistón, por lo que para un barrido eficiente es esencial cumplir con la mencionada ortogonalidad.

Así pues, se simularán diversas configuraciones de rejillas para optimizar estas características del flujo y detectar posibles tendencias que puedan servir para extrapolar a sistemas reales de desodorización.

## 4. Antecedentes

En virtud de los beneficios que aporta el sistema de ventilación de tipo flujo pistón frente al sistema de ventilación por mezcla, entre los que destaca la elevada eficiencia, se realizaron estudios previos en sistemas de desodorización del CABB en busca de una reducción del impacto odorífero de ellos. Por medio de métodos de CFD en el trabajo llevado a cabo por David Cuesta Herrero *"Simulación de flujo de fluidos en proceso de ventilación"* se estudió y obtuvo una optimización del sistema de ventilación en el edificio de recepción de residuos líquidos en la EDAR de Galindo; con ello se constató la mejora en la eficiencia y en la reducción de tiempo para evacuar contaminantes desprendidos por los residuos por una sustitución del sistema de ventilación incorporando el método flujo pistón [15]. Los resultados del diseño final se exponen en la Ilustración 19:

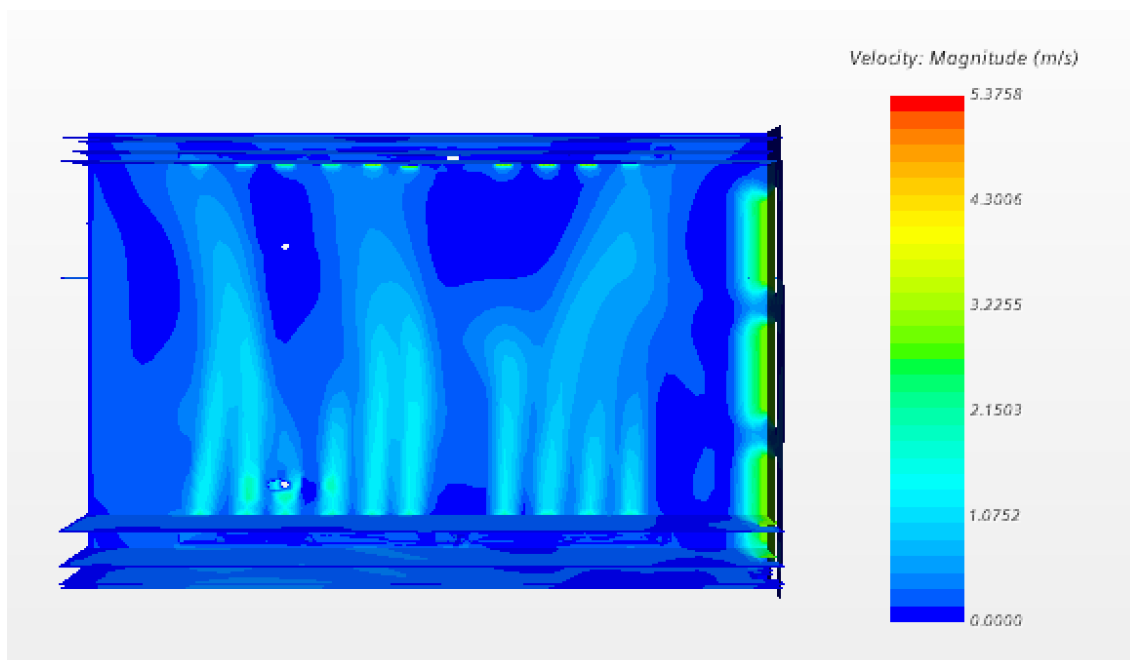
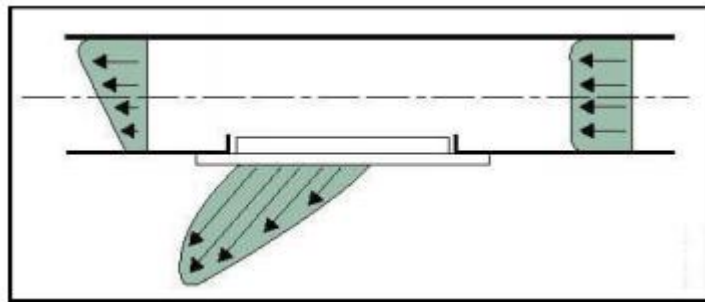


Ilustración 19: Velocidades del aire para el sistema de flujo pistón en el edificio de recepción de residuos líquidos (EDAR de Galindo) [15]

En esta ilustración se verifica una trayectoria aceptable del barrido a realizar en el interior del edificio, aun cuando las puertas de acceso a la estancia se encuentren abiertas. Para esta finalidad se emplean cortinas de aire que impulsan aire limpio para evitar el escape de malos olores al exterior (zonas verdes a la derecha de la ilustración).



No obstante, las simplificaciones llevadas a cabo de forma habitual en la realización de simulaciones con modelos CFD acarrearán la introducción de errores, que a su vez provocan que la solución obtenida no sea tan cercana a la realidad como se desea y, por tanto, se cuestione tanto el funcionamiento como la eficacia de estos diseños. En el caso de sistemas de ventilación en conducciones, es una práctica frecuente el imponer las condiciones de contorno de entrada y salida del aire en el área de contacto que presentan las rejillas con la estancia. Dicha hipótesis da lugar a un flujo uniforme de aire que mantiene una dirección completamente normal al área de las rejillas. La imposición de las condiciones a la salida de estos elementos obvia el efecto que podrían surtir las conducciones y demás elementos que conformen el sistema de ventilación aguas arriba de las rejillas, incluyendo estas mismas, en el ángulo de inyección del flujo aéreo. La Ilustración 20 muestra la distorsión provocada en el flujo de impulsión al situar una rejilla en el lateral de un conducto cuyo flujo discurre en dirección perpendicular a la salida de esta.



*Ilustración 20: Distorsión de la velocidad a lo largo de una rejilla instalada en el lateral de un conducto [2]*

A fin de corroborar este efecto y posibles correcciones del mismo, se realizó un estudio junto con BCAM (Basque Center for Applied Mathematics), dentro de un reto ESGI (European Study Groups with Industry) en el que se desestimó que el aire siguiera una trayectoria perpendicular [2]. Se concluyó que el aire, no solo contenía un desvío angular a su salida, también daba lugar a un desaprovechamiento de los recursos al reducir el área útil de las rejillas impulsoras.

Estas resoluciones motivan el estudio y la búsqueda de un diseño de rejillas de ventilación que dote al sistema de la capacidad de efectuar barridos laterales efectivos, a la par que minimice las pérdidas de carga para evitar altos consumos energéticos.

## 5. Análisis del estado del arte

A raíz de los resultados obtenidos en trabajos previos, se simula el conjunto de rejillas y conductos que conformarían el sistema de impulsión en el edificio de recepción de residuos líquidos en la EDAR de Galindo. Con ello se pretende corroborar la eficacia del sistema flujo pistón de forma más detallada y comprobar si existen discrepancias en los resultados al añadir elementos adicionales al modelo.

Las líneas de corriente en el modelo indican el grado de desvío generado por el conjunto de conductos, que a juzgar por la Ilustración 21 sería considerable. Las rejillas inferiores carecen de un desvío significativo, mas los caudales a través de estas resultan de inferior magnitud. Esto unido a las bajantes de las que proviene el aire, que absorben parte del impacto y efecto del flujo temprano, y la posición vertical de las rejillas dan como resultado una reducción en la direccionalidad no deseada en el sentido horizontal. Todas las superiores, sin embargo, presentan ángulos pronunciados y falta de homogeneidad en las aberturas.

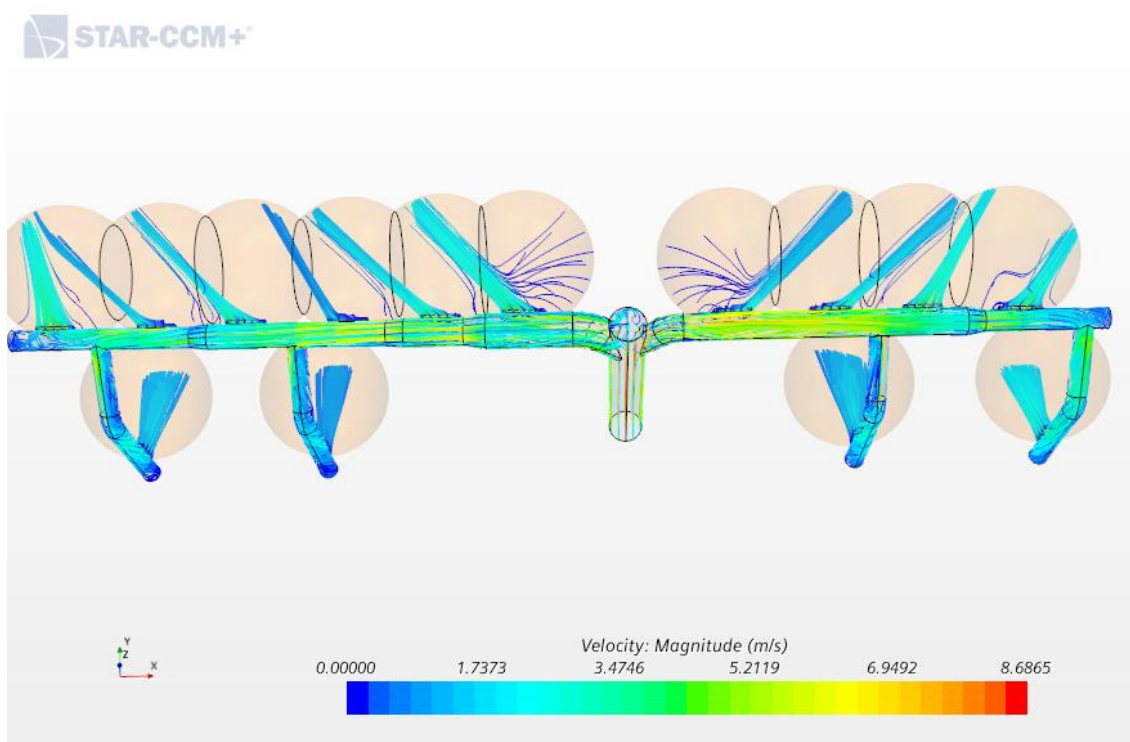
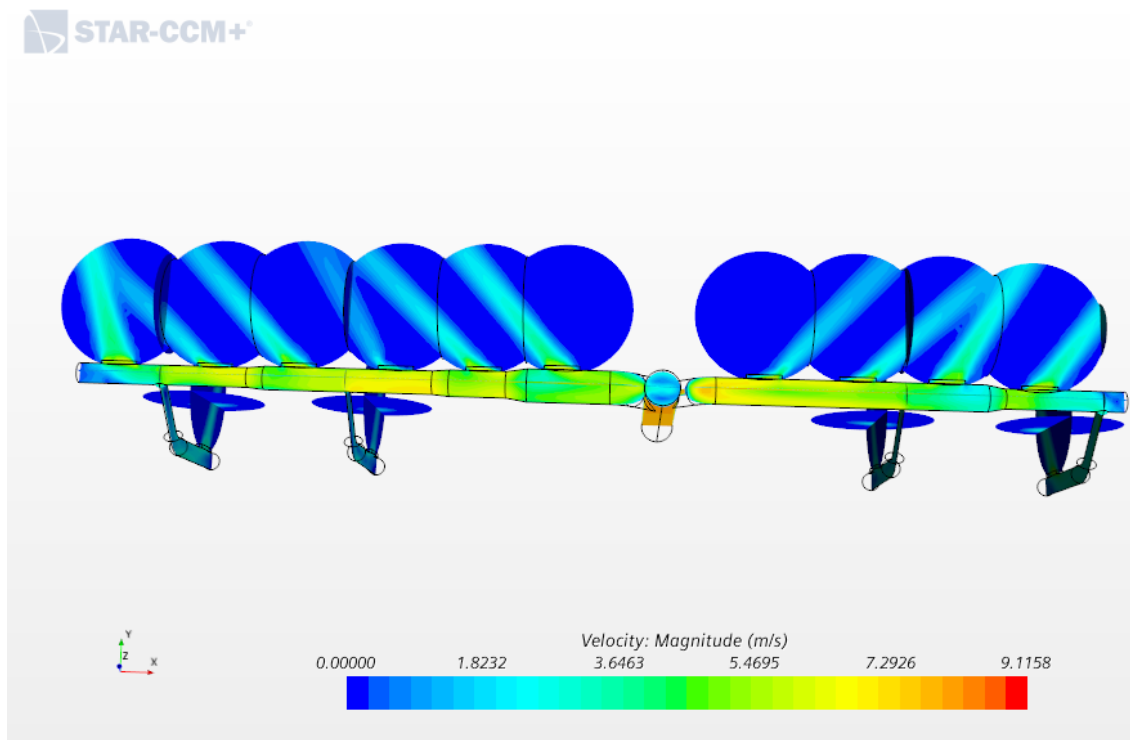


Ilustración 21: Líneas de corriente en las tuberías y rejillas de impulsión  
 (Edificio de recepción de residuos líquidos en la EDAR de Galindo)

Dicha tendencia se ve representada también en la Ilustración 22 mediante el escalar de velocidades. Para todos ellos la salida del aire a través de las rejillas superiores sufre un desvío respecto a la normal de la superficie, que es menos evidente en las rejillas finales debido a la sobrepresión que se genera al finalizar la tubería.



*Ilustración 22: Campo de velocidades en las tuberías y rejillas de impulsión*

*(Edificio de recepción de residuos líquidos en la EDAR de Galindo)*

Las variaciones de velocidad en el interior del ducto se deben a las reducciones de sección a lo largo del mismo, además del aire fluyente a través de las rejillas que abandona este. No obstante, para constatar que la causa de este fenómeno no sea un error a la hora de simular, se verifican los caudales con las secciones circulares de los diferentes tramos de tubería. Cuando no haya bifurcación entre una sección y otra el caudal deberá mantenerse constante; pues aplicando el principio de conservación de la masa esta debe mantenerse constante como enuncia su nombre. Cuando se den cambios de sección, con la aplicación de la ecuación de la continuidad se deduce que, para un diámetro inferior al tener que mantenerse el caudal constante, este debe acelerarse aumentando su velocidad. Este cambio de velocidad implica una variación en la presión,

aumentando en el caso de que el flujo decelere y viceversa. Por el contrario, cuando se bifurque el camino del aire, la suma del caudal de las secciones después de dicha bifurcación debe ser igual al caudal que circule por la sección anterior.

Se comprueba con esto que el trabajo realizado (propuesta de cambio del sistema de ventilación) es ideal y es necesario un estudio más detallado. Causa de ello es el desvío aparente a la salida de las aberturas, que provoca un claro decaimiento en la efectividad del barrido deseado. Al aplicar un sistema así los resultados finales no serían los mostrados en el apartado previo de antecedentes (ver aquí *Antecedentes*), sino que las direcciones de salida se verían perturbadas con lo que no se conseguiría solventar el problema de una edad media del aire alta en el centro de la estancia (zona con mayor concentración de contaminantes).

Se verifica la lógica de los resultados previos y sus tendencias (desvío que va decreciendo a medida que se avanza en el conducto para un tramo de sección constante) al consultar el artículo "A CFD analysis on improving lettuce canopy airflow distribution in a plant factory considering the crop resistance and LEDs heat dissipation" [16]. En él se presenta una tubería de impulsión con aberturas laterales que pretende insertar aire fresco en un entorno de cultivo. El sistema contiene la siguiente configuración:

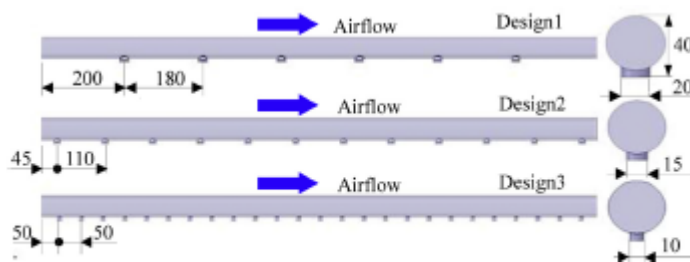


Fig. 4 – Proposed overhead perforated air tube design. Dimensions are in mm.

Ilustración 23: Disposición de las rejillas en el artículo [16]

Una vista en planta del sector de la estancia comunicada con la tubería mediante los orificios muestra una tendencia en las velocidades de salida que concuerda con lo mencionado con anterioridad.

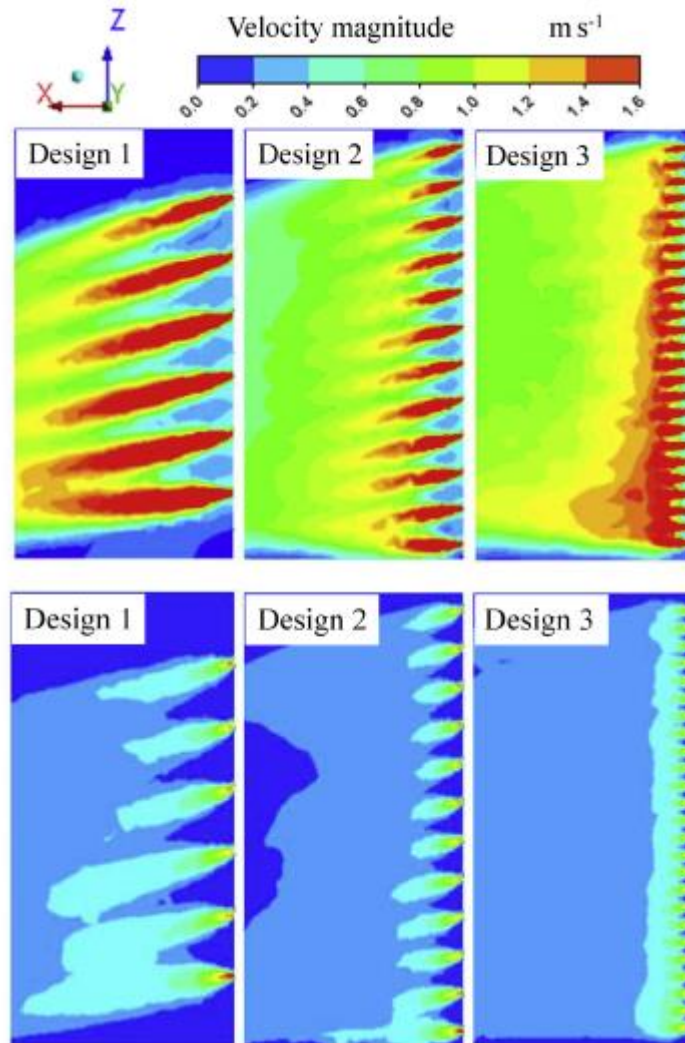


Ilustración 24: Distribución de velocidades en el artículo [16]

## 6. Beneficios que aporta el trabajo

Entre los numerosos beneficios que proporciona un correcto sistema de desodorización, particularmente en una estación de depuración de aguas residuales, se pueden encontrar los que se mencionan a continuación. Estos atañen a diversos ámbitos como el tecnológico, económico, social o incluso ambiental.

- **Beneficios tecnológicos**

El principal beneficio tecnológico que ofrece este proyecto es una mejora de la eficiencia del sistema de ventilación. Esta viene dada por una corrección del sistema de impulsión que permita una salida perpendicular del flujo de aire, que a su vez da lugar a un barrido del entorno a ventilar. El correcto funcionamiento de este método de ventilación supone un aumento de la efectividad en la eliminación de contaminantes que da lugar a beneficios de otras categorías. Además, el proyecto en cuestión supone un paso hacia el desarrollo de la tecnología CFD y su madurez, significando una ampliación en el rango de usos de esta. Del mismo modo, se adquiere el know-how de esta tecnología para poder aplicar a otros ámbitos y ampliar, a su vez, el conocimiento y funcionamiento de la ventilación y su conjunto de sistemas. En particular esta materia es de especial interés, ya que se trata de una necesidad básica que en numerosas ocasiones se da por hecho y se le resta importancia, y es de gran relevancia y aún con un amplio margen de mejora.

- **Beneficios económicos**

En lo referente al aspecto económico, como bien se ha mencionado antes, un sistema de impulsión que opera de manera adecuada precisa de una cantidad de energía inferior para llevar a cabo su función. Esto conlleva una reducción del coste de funcionamiento, ya sea por minimizar las pérdidas de carga presentes en el sistema o por una mejora de la eficacia del mismo. Por otro lado, se evitan sanciones legales referentes a incumplimientos de emisiones de contaminantes al entorno, así como de infracciones sanitarias en los entornos laborales. Por último, la implementación de esta metodología que es el CFD permite prescindir del método "prueba y error", reduciendo el coste de prototipos o ensayos. Esto se debe a que, al requerir un número menor de estos por realizar las simulaciones preliminares computacionalmente, se limitan las actividades de prototipado a



las alternativas más prometedoras a fin de constatar y validar los resultados obtenidos.

- **Beneficios ambientales**

La mejora en la eficiencia acarrea consigo un ahorro energético. De igual manera, una disminución del consumo energético da lugar a un menor impacto ambiental. Asimismo, y como ya se ha mencionado, un beneficio fundamental es la reducción del impacto odorífero en el entorno de la instalación y de la posible emanación de contaminantes potencialmente dañinos para el medioambiente.

- **Beneficios sociales**

De la mano de un menor impacto odorífero, y organoléptico en general, viene una mejora de la aceptación social de instalaciones como las EDAR, vitales para la gestión de las aguas urbanas. A esto último hay que añadir el garantizar una mayor salubridad del entorno de trabajo, requisito fundamental en instalaciones de esta índole.

## 7. Fundamentos teóricos

### 7.1. Definición de aire y composición

El aire es el resultado de la mezcla de gases que se encuentran suspendidos en la atmósfera terrestre y que se mantienen sujetos a nuestro planeta por efecto de la fuerza que aplica la gravedad en la Tierra.

Su composición consta principalmente de elementos como el oxígeno y el nitrógeno, además de otros componentes en menor proporción. Se estima que los componentes predominantes del aire son el oxígeno (20,94 %), el nitrógeno (78,08 %), el argón (0,93 %), el dióxido de carbono (0,035 %) y el vapor de agua (0,40 %). Otros elementos presentes en el aire de forma minoritaria son neón (0,0018 %), helio (0,0005 %), metano (0,00017 %), kriptón (0,00014 %), hidrógeno (0,00005 %) y amoníaco (0,0003 %) [17].

### 7.2. Propiedades del aire

Se trata de un gas transparente, incoloro, inodoro e insípido, excepto cuando contiene contaminación procedente de alguna sustancia que altere esta composición.

- **Densidad ( $\rho$ ):** magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. De este modo, la densidad media se define como la razón entre la masa de un cuerpo ( $m$ ) y el volumen que ocupa ( $V$ ) [18]:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Su unidad en el S.I. es kilogramo por metro cúbico ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ), adoptando un valor de  $1,225 \text{ Kg}/\text{m}^3$  para el caso de aire a presión atmosférica y una temperatura de  $15^\circ\text{C}$ . El valor de esta magnitud dista del mencionado al variar magnitudes como temperatura, altitud o humedad del aire.

- **Peso específico ( $\gamma$ ):** magnitud escalar que relaciona el peso de una sustancia y su volumen. Siendo  $g$  la aceleración debida a la gravedad terrestre, cuyo valor es  $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ , se define la expresión del peso específico como [19]:

$$\gamma = \rho g$$



Su medida en el S.I. va a ser de  $\text{N/m}^3$  y su valor para el aire va a ser de  $11,772 \text{ N/m}^3$ .

- **Presión:** fuerza normal ejercida por unidad de área, es decir, una fuerza ( $F$ ) dividida por el área sobre la que se distribuye la fuerza ( $A$ ) [19]. Su medida en el S.I. es de  $\text{N/m}^2$  (Pa, pascuales).

$$P = F/A$$

En el caso del aire, la presión va a rondar valores alrededor de la presión atmosférica. Ésta se define como la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire que forma la atmósfera sobre la superficie terrestre [19]. El valor de esta última es de  $101325 \text{ Pa}$ .

$$P \sim P_{atm} = 101325 \text{ Pa}$$

En el ámbito de ventilación o aeronáutica se utilizan algunos conceptos de presión que se definen a continuación:

- **Presión estática ( $P_e$ ):** Fracción de la presión del aire debida únicamente al grado de compresión del mismo. En otras palabras, es la fuerza por unidad de superficie aplicada en todas las direcciones y sentidos, al margen de los mismos parámetros de la velocidad. Así pues, si se midiera con una escala manométrica, podría obtener valores positivos, así como negativos. Su medición se puede realizar mediante un tubo piezométrico.
- **Presión dinámica ( $P_d$ ):** Fracción de la presión del aire debida únicamente a la velocidad del aire, medida en el mismo sentido de desplazamiento que dicho fluido. Es por ello que, si se aplicara una escala manométrica, solamente puede ser positiva. Su medición se puede llevar a cabo mediante el tubo de Prandtl (combinación de un tubo piezométrico, que determina la presión estática, y un tubo de Pitot, que mide la presión total, dando como resultante una medición diferencial: la presión dinámica).
- **Presión total ( $P_T$ ):** Se denomina así a la suma de la presión estática y dinámica del aire. Su medición se realiza con el tubo de Pitot.

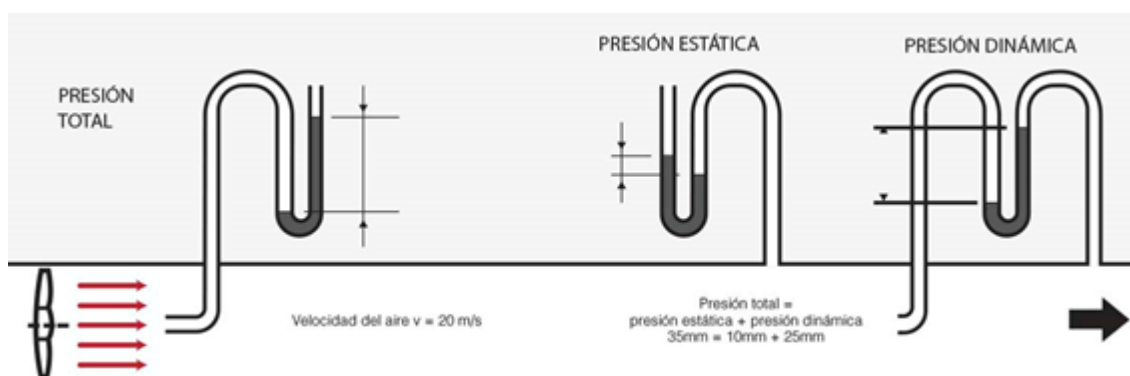


Ilustración 25: Esquema de medición de tipos de presión en un conducto de ventilación [20]

- **Viscosidad:** es la resistencia de un fluido a la deformación. En condiciones normales de presión y temperatura (temperatura 20°C y presión la atmosférica) el aire se trata de un fluido newtoniano. Un fluido newtoniano es aquel que cumple la ley de Newton, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$\tau = \mu \times \frac{dv}{dy}$$

Siendo  $\tau$  el esfuerzo cortante o tangencial aplicado al fluido,  $\mu$  la viscosidad dinámica y  $\frac{dv}{dy}$  el gradiente de velocidad o velocidad de deformación lineal.

En el movimiento unidireccional del fluido, la tensión de arrastre o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad. El coeficiente de proporcionalidad es la viscosidad dinámica. Las unidades de esta última en el S.I. es de Pa·s y su valor para el aire a 20°C es:

$$\mu = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

En muchas aplicaciones, se utiliza la viscosidad cinemática, relación entre la viscosidad absoluta y la densidad:

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

Una variación en la temperatura del fluido conllevaría una variación significativa de las propiedades previamente mencionadas. No obstante, se considerará que el aire mantendrá una temperatura constante a lo largo de

las simulaciones, por lo que no se tendrán en cuenta posibles variaciones de las magnitudes especificadas [19].

- **Compresibilidad:** Cuando las variaciones en densidad dentro de un flujo no se pueden despreciar se denomina a este flujo compresible; de forma análoga, se denomina flujo incompresible al flujo en el cual las variaciones de densidad son despreciables o insignificantes. Por tanto, se define la compresibilidad como el cambio relativo en el volumen del fluido en relación con un cambio de una unidad de presión.

Si se consideran los dos estados de la materia incluidos en la definición de fluido, líquido y gas, se podría caer en el error de generalizar diciendo que todos los flujos líquidos son incompresibles y todos los flujos gaseosos son compresibles. Para la mayor parte de los casos prácticos, se puede considerar un flujo líquido como incompresible; no así para los gases en los que su velocidad ejerce un papel importante. Se emplea para esto el número de Mach (M), razón de la velocidad del flujo ( $v$ ) a la velocidad del sonido ( $c$ ) en el medio fluido:

$$M = \frac{v}{c}$$

Siendo así, los cambios en densidad son muy reducidos (del orden del 2 % de valor medio) para valores del número de Mach inferiores a 0,3. Este valor límite,  $M=0,3$ , se corresponde bajo condiciones normales a una velocidad del aire de 100 m/s. Es por ello que para velocidades de flujo inferiores a las mencionadas (las cuales no se superan en ningún caso para el caso estudiado) se trata el flujo como incompresible [21].

## 8. Descripción del software utilizado

Para la realización del análisis propuesto es necesario el apoyo de una herramienta informática capaz de resolver complejos problemas fluidodinámicos. Dicha herramienta la compondrá un software de CFD, mecánica de fluidos computacional o Computational Fluid Dynamics del inglés, que en este caso será Simcenter STAR-CCM+. El software propiedad de Siemens es el escogido para la tarea del análisis de optimización de rejillas de ventilación, siendo este una de las opciones más escogidas en el mercado junto con Ansys Fluent y OpenFOAM. En concreto se realiza el trabajo con la versión STAR-CCM+ 2019.3 (Build 14.06.012-R8). Aunque solamente se puedan alcanzar soluciones aproximadas cometiendo un pequeño error, permiten la simulación numérica de numerosos problemas reales proporcionando una respuesta veraz como no se podría hacer de forma manual, con el objetivo de modelar el comportamiento de fluidos o partículas en diversos entornos y condiciones.

La Mecánica de Fluidos Computacional, es una de las ramas de la Mecánica de Fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas que involucran flujos de fluidos apoyándose en la potencia de cálculo de los ordenadores. Podría decirse, por tanto, que se trata de una rama de la ciencia que engloba a las otras tres, como se puede ver en la Ilustración 26:



Ilustración 26: Relación de CFD con otras ramas de la ciencia [22]

Gracias a la capacidad actual de los ordenadores, esta metodología se encuentra extensamente aplicada ya que, éstos son capaces de realizar y resolver los millones de cálculos necesarios para simular la interacción de los líquidos y los

gases con las superficies definidas por las condiciones de contorno definidas por el usuario [22].

La utilización de sus conocimientos en el ámbito ingenieril es cada vez mayor, dada su importancia y sus numerosos aportes. Puede participar en la fase de diseño de un producto, ayudando a determinar su viabilidad o a escoger la solución óptima, así como en otras fases representando diversos escenarios y buscando la optimización de un sistema actualmente en funcionamiento. Desde simular aerodinámica a realizar la gestión de recursos hídricos, su versatilidad ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en diferentes segmentos de la industria. Su constante desarrollo y capacidad de estudio de diversos fluidos han conseguido que esta tecnología prospere, abriéndose paso incluso en ámbitos sanitarios para el estudio de la hemodinámica.

## 8.1. Metodología de resolución

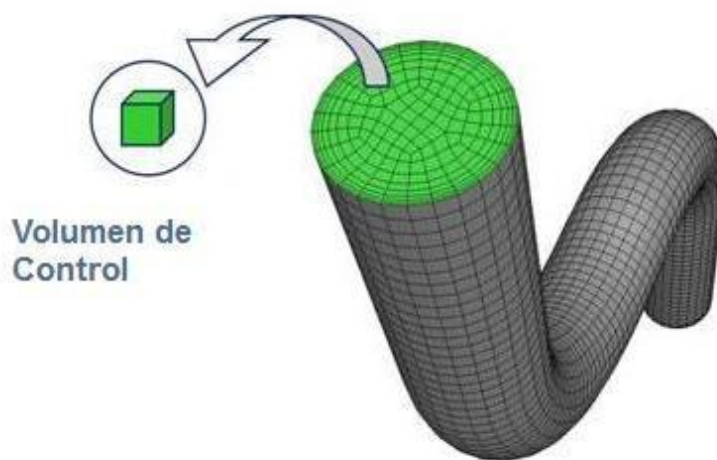
La principal ecuación resuelta vía fluidodinámica computacional es la ecuación de transporte de la variable de interés, representada por el símbolo  $\phi$ . Dicha ecuación se representa de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} \int_0^V \rho \phi dV + \oint_0^A \rho \phi \vec{u} \cdot dA = \oint_0^A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_0^V S_\phi dV$$

Todas las ecuaciones de conservación resueltas en Dinámica de Fluidos Computacional poseen la forma anterior, con cuatro términos: el término de tiempo o transitorio, el término advectivo, el término difusivo y el término fuente. Para representar las diferentes ecuaciones de conservación se alteran sólo tres componentes de la ecuación: la variable  $\phi$ , el coeficiente de difusión  $\Gamma$  y la fuente  $S$ .

Por ejemplo, para la ecuación de conservación de masa (o continuidad), la variable es igual a 1, mientras que el coeficiente de difusión y la fuente son nulos. A pesar de que la fórmula es ampliamente utilizada para aplicaciones CFD, se puede afirmar que hasta el momento no existe solución analítica de la ecuación citada. De esa forma, es necesario resolverla por medio de algún método de discretización.

Los métodos de discretización más difundidos son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo este último el más utilizado en Dinámica de Fluidos Computacional. Con esos métodos, se intercambia el dominio continuo por un dominio discreto, donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar el dominio original. El dominio es discretizado en pequeños volúmenes y la ecuación algebraica es resuelta para cada uno de esos elementos. En la Ilustración 27 se puede observar el resultado:



*Ilustración 27: Ejemplo de discretización por el método de volúmenes finitos [23]*

Así pues, se genera un sistema de ecuaciones algebraicas que debe ser resuelto numéricamente. Esas ecuaciones son resueltas mediante el software, el cual posee capacidad para solucionar éstas rápidamente y con precisión [23].

## 8.2. Hipótesis y leyes

En este subapartado se exponen las principales suposiciones y leyes a tener en cuenta al tratar con el problema de mecánica de fluidos computacional en cuestión.

En cuanto a las hipótesis adoptadas en lo referente al fluido, se consideran las siguientes:

- **Hipótesis del medio continuo:** se trata de la hipótesis fundamental de la mecánica de fluidos, según la cual se considera que el fluido es continuo a lo largo del espacio que ocupa, ignorando por lo tanto su estructura molecular



y las discontinuidades asociadas a esta. En consecuencia, las propiedades macroscópicas de un fluido (densidad, viscosidad, temperatura...) son también funciones continuas en el espacio y el tiempo (es decir, tienen un determinado valor en cualquier punto del espacio del medio fluido, correspondiéndole a este punto, un volumen pequeño pero que contenga grandes cantidades de moléculas). Esto permite el uso del cálculo diferencial para su análisis [19].

- **Enfoque diferencial:** descripción del fluido mediante las propiedades físicas en todos y cada uno de los puntos de la masa fluida aplicando las leyes en forma diferencial a todos los puntos del espacio. Este es el enfoque que sigue el programa o herramienta utilizada en este proyecto para la simulación (software CFD).
- **Régimen estacionario:** estado de un sistema físico en el cual las características relevantes permanecen invariables a lo largo del tiempo.

Para la descripción del movimiento del fluido se recurre a las principales leyes de la mecánica de fluidos:

### 1) Ley de conservación de la masa

Enuncia que “la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma”. Esta se puede expresar de forma diferencial mediante la ecuación de continuidad. En dinámica de fluidos, la ecuación de continuidad establece que la velocidad a la que la masa ingresa en un sistema es igual a la velocidad a la que la masa abandona el sistema más la acumulación de masa en el interior del mismo. Expresada en forma diferencial la ecuación de continuidad adoptaría la siguiente forma:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

Donde  $\rho$  se corresponde con la densidad del fluido,  $t$  con el tiempo y  $\vec{u}$  con el vector velocidad del flujo. La derivada con respecto del tiempo se puede entender como la acumulación o pérdida de masa del sistema, mientras que el término de la divergencia representa la diferencia entre el flujo saliente y entrante [24].

Dadas las características del flujo y como se ha mencionado previamente, se considera un flujo incompresible; lo que suprime la variación de la densidad



respecto del tiempo (anula el término  $\frac{d\rho}{dt}$  de la ecuación), y consecuentemente se estima una densidad constante. Por tanto, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{du_x}{dt} + \frac{du_y}{dt} + \frac{du_z}{dt} = 0$$

Los términos  $u_x$ ,  $u_y$  y  $u_z$  representan las componentes de la velocidad  $\vec{u}$  citada anteriormente. Se trata de una de las 4 ecuaciones de Navier-Stokes para el caso de un fluido incompresible.

## 2) Ley de conservación de la cantidad de movimiento

La conservación local de la cantidad de movimiento se expresa mediante la ecuación de la cantidad de movimiento de Cauchy:

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}$$

Donde  $\rho$  representa la densidad en el punto considerado,  $\vec{\tau}$  el tensor de tensiones,  $\vec{f}$  la fuerza volumétrica sobre el cuerpo (campo vectorial que caracteriza las fuerzas másicas y de otros tipos en un medio continuo) y  $\vec{u}$  la velocidad, dependiente del tiempo así como del espacio.

El tensor de tensiones  $\vec{\tau}$  es un tensor de segundo orden formado por nueve componentes  $\tau_{ij}$  que definen completamente el estado de tensiones y esfuerzos internos en un punto del material. La fuerza volumétrica  $\vec{f}$  está relacionada con la divergencia del tensor tensión mediante la relación posterior:

$$\vec{f} = \nabla \cdot \vec{\tau}$$

Asimismo, el tensor  $\vec{\tau}$  se puede expresar como la suma de otros dos tensores de tensiones:

$$\vec{\tau} = -p \times \mathbf{I} + \vec{\tau}_v$$

Donde  $p$  es la presión,  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad y  $\vec{\tau}_v$  es el tensor de tensiones viscoso. El primer sumando se corresponde con el tensor de presión hidrostática, el cual tiende a cambiar el volumen del cuerpo. El segundo





sumando se conoce como tensor de tensiones viscoso, causante de su distorsión.

En esta ecuación se emplea la derivada material, la cual se define de la siguiente forma:

$$\frac{D}{dt} = \frac{d}{dt} + \vec{u} \cdot \nabla$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes son una forma particular de la ecuación de cantidad de movimiento de Cauchy. En un sistema de referencia inercial, la forma conservativa de las ecuaciones del movimiento continuo es la siguiente:

$$\frac{d}{dt}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla \cdot pI + \nabla \cdot \vec{\tau}_v + \rho \vec{f}$$

Siendo  $\otimes$  el producto tensorial que se define de la siguiente forma  $\vec{u} \otimes \vec{v} = \vec{u} \otimes \vec{v}^T$ .

El lado izquierdo de la ecuación describe la aceleración y puede estar compuesto de términos dependientes del tiempo y convectivos. También se incluirían los efectos de coordenadas no inerciales. El lado derecho está formado por una suma de las fuerzas volumétricas como la gravedad, los efectos hidrostáticos y la divergencia del tensor de tensiones viscoso.

Desarrollando esta ecuación en el sistema de coordenadas cartesiano de referencia xyz, las ecuaciones de Navier-Stokes quedan de esta manera:

Componente x:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho u_x)}{dt} + \frac{d(\rho u_x^2)}{dx} + \frac{d(\rho u_x u_y)}{dy} + \frac{d(\rho u_x u_z)}{dz} \\ = -\frac{dp}{dx} + \frac{d}{dx} \left( \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{du_x}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left[ \mu \left( \frac{du_y}{dx} + \frac{du_x}{dy} \right) \right] \\ + \frac{d}{dz} \left[ \mu \left( \frac{du_y}{dz} + \frac{du_z}{dx} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned}$$



Componente y:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho u_y)}{dt} + \frac{d(\rho u_x u_y)}{dx} + \frac{d(\rho u_y^2)}{dy} + \frac{d(\rho u_y u_z)}{dz} \\ = -\frac{dp}{dy} + \frac{d}{dx} \left[ \mu \left( \frac{du_y}{dx} + \frac{du_x}{dy} \right) \right] + \frac{d}{dy} \left( \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{du_y}{dy} \right) \\ + \frac{d}{dz} \left[ \mu \left( \frac{du_z}{dy} + \frac{du_y}{dz} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned}$$

Componente z:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho u_z)}{dt} + \frac{d(\rho u_x u_z)}{dx} + \frac{d(\rho u_y u_z)}{dy} + \frac{d(\rho u_z^2)}{dz} \\ = -\frac{dp}{dz} + \frac{d}{dx} \left[ \mu \left( \frac{du_x}{dz} + \frac{du_z}{dx} \right) \right] + \frac{d}{dy} \left[ \mu \left( \frac{du_z}{dy} + \frac{du_y}{dz} \right) \right] \\ + \frac{d}{dz} \left( \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{du_z}{dz} \right) + \rho f_z \end{aligned}$$

Siendo las componentes del tensor viscoso:

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \frac{du_x}{dx} \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu \left( \frac{du_y}{dx} + \frac{du_x}{dy} \right) \end{aligned}$$

y así con la dirección y y con la dirección z del sistema de referencia cartesiano.

Además:  $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$

Siendo  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido,  $\rho$  su densidad y  $\tau_{ij}$  las componentes del tensor de tensiones [24].

Al igual que en la ley de conservación de la masa, se considera el fluido viscoso pero incompresible. De este modo se anulan las componentes del tensor viscoso, quedando la densidad y viscosidad constantes. Por lo tanto, las 3 ecuaciones de Navier-Stokes restantes quedan expresadas de la siguiente manera:



$$\rho \left( \frac{du_x}{dt} + u_x \frac{du_x}{dx} + u_y \frac{du_x}{dy} + u_z \frac{du_x}{dz} \right) = \mu \left[ \frac{d^2 u_x}{dx^2} + \frac{d^2 u_x}{dy^2} + \frac{d^2 u_x}{dz^2} \right] - \frac{dp}{dx} + \rho g_x$$

$$\rho \left( \frac{du_y}{dt} + u_x \frac{du_y}{dx} + u_y \frac{du_y}{dy} + u_z \frac{du_y}{dz} \right) = \mu \left[ \frac{d^2 u_y}{dx^2} + \frac{d^2 u_y}{dy^2} + \frac{d^2 u_y}{dz^2} \right] - \frac{dp}{dy} + \rho g_y$$

$$\rho \left( \frac{du_z}{dt} + u_x \frac{du_z}{dx} + u_y \frac{du_z}{dy} + u_z \frac{du_z}{dz} \right) = \mu \left[ \frac{d^2 u_z}{dx^2} + \frac{d^2 u_z}{dy^2} + \frac{d^2 u_z}{dz^2} \right] - \frac{dp}{dz} + \rho g_z$$

### 3) La ley de conservación de la energía

La ley de conservación de la energía enuncia que la cantidad total de energía en cualquier sistema físico aislado permanece invariable en el tiempo. Dicho de otro modo, la energía no puede crearse ni destruirse, solo transformarse. Consecuencia directa de esta ley es el primer principio de la termodinámica, el cual establece que, al suministrar una determinada cantidad de calor a un sistema, esta cantidad de energía debe ser igual a la diferencia del incremento interna del sistema más el trabajo realizado por el sistema:

$$Q = \Delta U + W$$

La ecuación de conservación de la energía adopta la siguiente estructura en forma diferencial:

$$\rho \frac{D}{Dt} \left( e + \frac{u^2}{2} \right) = \nabla \cdot (\vec{\tau} \vec{u}) + \rho \vec{f}_m \vec{u} - \nabla \cdot \vec{q} + \Omega_r + \Omega_q$$

Donde  $e$  representa la energía interna por unidad de masa,  $\vec{\tau}$  el tensor de tensiones,  $\vec{f}_m$  las fuerzas másicas, y  $\vec{q}$  el vector correspondiente al flujo de calor por unidad de superficie. Este último se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{q} = -k \nabla T$$

Siendo  $k$  la conductividad térmica.

Por lo tanto, la variación de la energía por unidad de tiempo y volumen se expresa en función de  $\nabla \cdot (\vec{\tau} \vec{u})$ , que representa la potencia debida a las fuerzas de superficie por unidad de volumen,  $\rho \vec{f}_m \vec{u}$ , que representa la potencia debida a las fuerzas externas por unidad de volumen,  $\nabla \cdot \vec{q}$ , que representa la potencia por conducción por unidad de volumen, y los

términos  $\Omega_r + \Omega_q$ , que determinan la potencia generada por unidad de volumen por radiación y por reacción química, respectivamente [24].

### 8.3. Modelado de turbulencia

Otra gran variable a tener en cuenta es la turbulencia, presente en una gran cantidad de flujos y que dificulta el estudio de los mismos.

*“Turbulence is the most important unsolved problem of classical physics”* (Richard Feynman, Físico teórico americano y Premio Nobel en Física en 1965). Así definía el reconocido y laureado físico Richard Feynman la complejidad del estudio de la turbulencia. Este mismo fenómeno se caracteriza por presentar los siguientes comportamientos en el flujo turbulento:

- **Irregularidad:** un flujo turbulento es irregular, aparentemente aleatorio y caótico. El flujo consiste en un amplio espectro de remolinos de diferentes tamaños, donde los más grandes son del orden de magnitud de la geometría característica y los más pequeños son disipados en forma de energía interna por medio de las fuerzas viscosas existentes en el propio fluido [25].
- **Difusividad:** en un flujo turbulento la difusividad aumenta, lo que se traduce en una rápida mezcla de cantidad de movimiento, calor y masa [26].
- **Disipación:** la energía cinética de los remolinos de menor escala se disipa en forma de energía interna en el fluido. Los más grandes, por su parte, disipan parte de su energía cinética cediéndosela posteriormente a remolinos de escalas más pequeñas. Este proceso de cesión de energía o disipación se conoce por el nombre de *proceso en cascada* [25]. La fuente de energía necesaria para producir la turbulencia debe tener su origen en la contenida en el flujo principal, debida a la interacción de los esfuerzos cortantes y de los gradientes de temperatura [26].
- **Ocurre a un elevado número de Reynolds:** la turbulencia no es una propiedad propia de un fluido determinado sino un tipo de flujo que se da a altos números de Reynolds. Ello significa que a medida que las fuerzas de inercia ganan terreno a las fuerzas viscosas, una leve perturbación o inestabilidad en el flujo provocada en el fluido hace aflorar este fenómeno.
- **Tridimensional:** las fluctuaciones pueden ocurrir en cualquier dirección, aun tratándose de un flujo principalmente bidimensional.



Dada la complejidad de este fenómeno y la finalidad en este proyecto con propósito de ingeniería el modelado de turbulencia es necesario, pues no se desean los detalles de las fluctuaciones turbulentas, sino un valor promedio que la describa. Dicho de otro modo, se busca el efecto de la turbulencia en el flujo medio. Para esta tarea se emplean los llamados modelos de turbulencia.

En los flujos turbulentos las variables incluidas en las ecuaciones que definen el movimiento del fluido tales como la velocidad, densidad, temperatura y presión fluctúan de forma aleatoria, no son periódicas ni repetitivas, causando una fuerte mezcla de las cantidades transportadas. A pesar de estas fluctuaciones, si las condiciones de contorno que gobiernan el problema son estacionarias, se puede esperar que el valor medio de las variables turbulentas también lo sea. Este hecho ha motivado que a lo largo de la historia se haya desarrollado un enfoque estadístico de la turbulencia [27].

La inexistencia de un método universalmente aceptado u óptimo para todos los casos lleva a escoger un modelo que se adapte a las condiciones del flujo en cuestión. El enfoque más evidente a priori puede resultar la resolución numérica directa de las ecuaciones de Navier-Stokes, o lo que se conoce como DNS (acrónimo de Direct Numerical Simulation en inglés). No obstante, aunque preciso, el coste computacional de este método es desorbitado por lo que su práctica queda restringida a problemas o casos muy determinados. Otro enfoque es el de calcular con mayor precisión las grandes escalas de turbulencia modelando las más reducidas; se llevaría a cabo mediante los modelos LES (acrónimo de Large Eddy Simulation). El coste computacional se reduce en comparación al método anterior, pero las cantidades de tiempo de cálculo siguen siendo excesivas. La forma más habitual de resolución o modelado de turbulencia en la práctica se basa en el promediado previamente mencionado llamado modelos RANS (del inglés Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations). Es por ello que en este trabajo solo se empleará modelos de turbulencia RANS, obteniendo resultados fiables con un coste computacional aceptable.

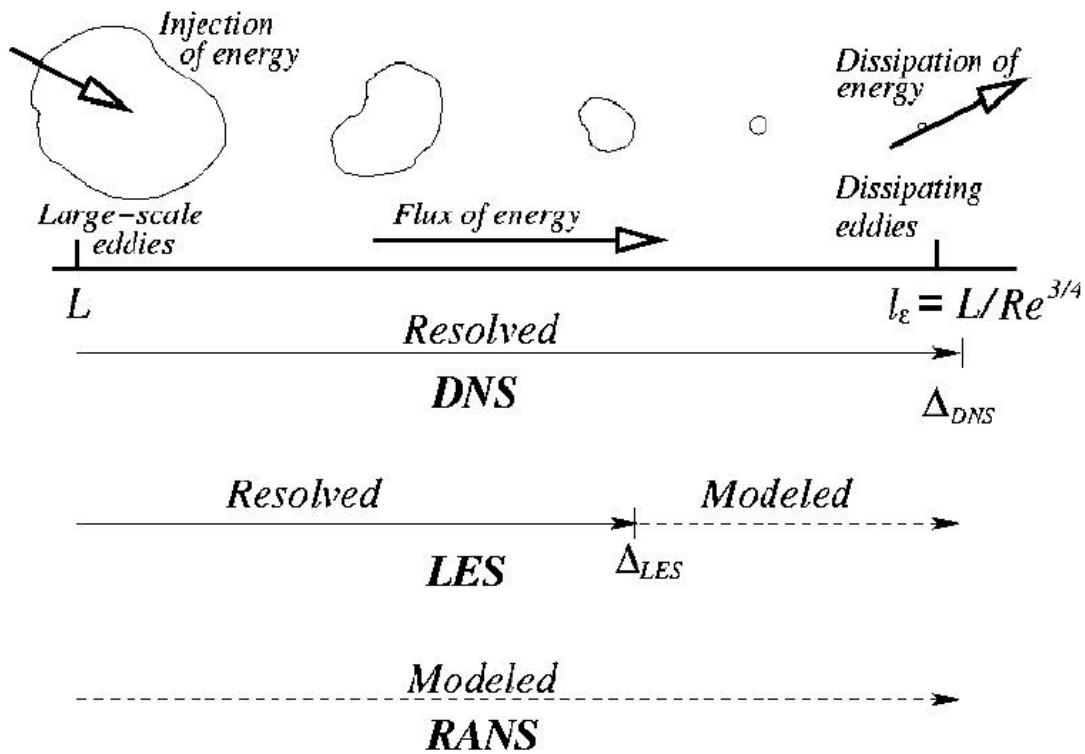


Ilustración 28: Resolución y modelización de la turbulencia según el método de resolución [28]

Como puede observarse en la Ilustración 29, a menor cantidad de turbulencia modelada mayor es también el grado de nitidez de los resultados y los vórtices creados. Al modelar esta por utilizar el método RANS, se pierde la capacidad de visualización de estos, sobre todo a pequeña escala, pero en contrapartida se reduce drásticamente el tiempo de simulado.

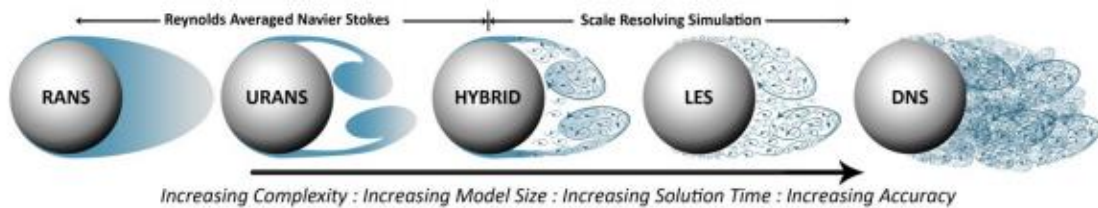


Ilustración 29: Ejemplo de resultados extraídos para el caso de una esfera contrapuesta a un flujo turbulento [29]

### 8.3.1. Ecuaciones RANS

Puesto que se ha escogido emplear el método RANS para la resolución del problema, se describen a continuación las ecuaciones pertinentes a este, también llamadas ecuaciones RANS. El principio en el que se basan estas ecuaciones es en la suposición de un flujo turbulento pero que podría ser considerado poco dependiente del tiempo. Esto conlleva a asumir un flujo formado por fluctuaciones superpuestas a una corriente principal estacionaria [30].

Así pues, esta asunción da lugar a una descomposición de las variables del flujo en su valor medio más la fluctuación que se expresa de la siguiente manera:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

Donde  $\phi$  representa la variable en cuestión,  $\bar{\phi}$  la parte promediada y  $\phi'$  la fluctuación de la misma. El promedio en el tiempo se describe de la siguiente manera:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{T} \int_0^T \phi(x, t) dt$$

Para la cual  $T$  representa un periodo de tiempo determinado y  $\phi(x, t)$  la variable en función del tiempo, así como de la posición.

De ahí provienen las siglas que dan nombre a las ecuaciones, pues se promedian las ecuaciones de Navier-Stokes mediante el método de Reynolds. La descomposición llevada a cabo se refleja gráficamente en la Ilustración 30 para la variable de velocidad ( $v$ ) de una partícula, con  $\langle v \rangle$  como valor promedio y  $v'$  como fluctuación de la misma:

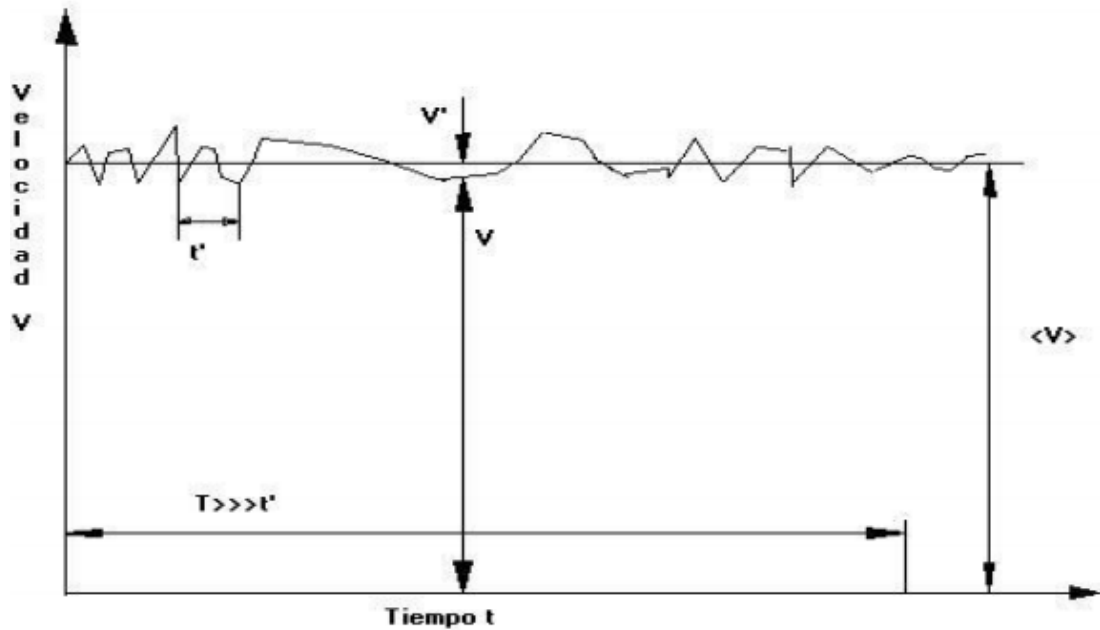


Ilustración 30: Velocidad de una partícula en función del tiempo en régimen turbulento [26]

Al operar con valores promedio de las variables se han de tener en cuenta algunas propiedades importantes:

- El promedio de un término fluctuante es cero. Para el caso concreto de la velocidad:

$$\overline{u'_i} = 0$$

- El producto de dos cantidades fluctuantes no es cero si las magnitudes están correlacionadas, lo que da como resultado un transporte neto de momento. Por ejemplo:

$$\overline{u'_i u'_j} \neq 0$$





A continuación, se muestran las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial para fluidos incompresibles en caso de que el flujo sea laminar:

$$\frac{du_i}{dx_i} = 0$$

$$\frac{du_i}{dt} + u_j \frac{du_i}{dx_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_i} + \vartheta \nabla^2 u_i$$

Donde  $u_i$  representa la velocidad del fluido en la dirección  $x_i$  (del mismo modo que  $u_j$  en la dirección  $x_j$ ),  $p$  la presión del mismo,  $\vartheta$  la viscosidad cinemática del fluido y  $\nabla^2$  el operador de Laplace.

Si se sustituye la descomposición de las variables de flujo en las ecuaciones de conservación de la masa y conservación de la cantidad de movimiento, a la par que se introducen las propiedades del operador medio (ambas mencionadas con anterioridad en este subapartado) se obtienen las siguientes ecuaciones RANS. Estas corresponden a un flujo incompresible en régimen turbulento:

$$\frac{d\bar{u}_i}{dx_i} = 0$$

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} + \rho \bar{u}_j \frac{d\bar{u}_i}{dx_j} = \frac{d\bar{p}}{dx_i} + \frac{d}{dx_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j})$$

Donde  $\bar{u}_i$  y  $\bar{u}_j$  se refieren al promedio temporal de la velocidad del fluido en sus correspondientes direcciones ( $x_i$  y  $x_j$ ),  $u'_i$  y  $u'_j$  a las fluctuaciones en la misma variable en sus respectivas direcciones,  $\bar{p}$  al valor medio de la presión del fluido y  $\rho$  a su densidad. Finalmente, el término  $\bar{\tau}_{ij}$  se expresa como se observa a continuación:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{d\bar{u}_i}{dx_j} + \frac{d\bar{u}_j}{dx_i} \right)$$

Dicho esto, puede comprobarse que las ecuaciones logradas son idénticas a las ecuaciones de Navier-Stokes obtenidas para el régimen laminar a excepción del término posterior:

$$\tau_{ij}^R = \rho \overline{u'_i u'_j}$$



Este se conoce como tensor de esfuerzos de Reynolds, cuyo significado físico es la transferencia de momento debido a las fluctuaciones turbulentas [30].

Debido a la aparición de este último término, se han añadido nuevas incógnitas y, puesto que el número de ecuaciones no ha aumentado, se produce un problema de cierre. La no linealidad de las ecuaciones de Navier-Stokes implica que las fluctuaciones de velocidad todavía aparecen en las ecuaciones RANS, concretamente en el tensor. Para obtener ecuaciones que solo incluyan la velocidad y la presión medias, hay que cerrar las ecuaciones RANS modelizando este término como una función del flujo medio, lo que eliminaría cualquier referencia a la parte fluctuante de la velocidad. En ello consiste el problema de cierre [31].

Para tal propósito, existen diversos modelos de turbulencia dentro del método RANS anteriormente descrito. Habitualmente se agrupan en función del número de ecuaciones que emplean para su modelización, encontrando de esta manera desde modelos de una sola ecuación (Spalart-Allmaras, desarrollado para aplicaciones aeroespaciales) hasta modelos de dos ecuaciones ( $k$ - $\epsilon$  y  $k$ - $\omega$ , entre otros).

#### 8.3.1.1. Modelo de turbulencia $k$ - $\epsilon$

Se trata del modelo de turbulencia más empleado para simular las características del flujo medio en régimen turbulento. Su robustez, economía y precisión razonable para un amplio rango de aplicaciones lo convierten en uno de los modelos más implantados a nivel industrial.

Dicho modelo introduce dos ecuaciones de transporte adicionales con sus respectivas dos variables. La primera de ellas se denomina energía cinética turbulenta ( $k$ ) y determina la energía proveniente de la turbulencia, como su nombre indica. La segunda variable se conoce como disipación de la energía turbulenta ( $\epsilon$ ).

Dentro del propio modelo  $k$ - $\epsilon$  se pueden escoger diversas variantes, entre las que se encuentran, por ejemplo, RNG, estándar y realizable.

### 8.3.1.2. Modelo de turbulencia k-ε estándar

Esta variante introduce las siguientes ecuaciones de transporte con las dos incógnitas mencionadas anteriormente; la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la disipación de la misma ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_i} \left( \rho \bar{u}_i k - \Gamma^{(k)} \frac{dk}{dx_i} \right) = \rho (P^{(k)} - \varepsilon)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \varepsilon) + \frac{d}{dx_i} \left( \rho \bar{u}_i \varepsilon - \Gamma^{(\varepsilon)} \frac{d\varepsilon}{dx_i} \right) = \rho (C_{\varepsilon 1} P^{(k)} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$$

Donde los términos  $\Gamma^{(k)}$  y  $\Gamma^{(\varepsilon)}$  se corresponden con las difusividades de  $k$  y  $\varepsilon$ , definidos mediante las siguientes expresiones:

$$\Gamma^{(k)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$$

$$\Gamma^{(\varepsilon)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$$

Estos son dependientes de la viscosidad molecular ( $\mu$ ) y la viscosidad turbulenta ( $\mu_t$ ); la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

El término  $P^{(k)}$ , por otro lado, representa la tasa de variación de la producción de energía cinética turbulenta (por unidad de masa). Ello convierte el término de fuentes en la ecuación de  $k$  en un balance entre la producción ( $P^{(k)}$ ) y la disipación ( $\varepsilon$ ). La producción vendría dada por:

$$P^{(k)} = \vartheta_t \left( \frac{d\bar{u}}{dy} \right)^2$$

Esta expresión es más compleja para flujos arbitrarios, pero para este modelo en concreto va a ser siempre positiva y proporcional al cuadrado del gradiente de la velocidad media  $\bar{u}$  y a la viscosidad cinemática turbulenta  $\vartheta_t$  [30].

Finalmente, se muestran los valores de las constantes adoptadas para este modelo concreto; pues es necesario remarcar que se trata de modelos semiempíricos:

$$C_\mu = 0,09, C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1,3$$

### 8.3.1.3. Modelo de turbulencia k- $\varepsilon$ realizable

El modelo k- $\varepsilon$  realizable sustituye el valor constante de  $C_\mu$  por una expresión que le otorga un valor variable.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$

De este modo, mientras la ecuación para  $k$  se mantiene intacta, la ecuación para  $\varepsilon$  varía adoptando la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt}(\rho\varepsilon) + \frac{d}{dx_i}(\rho\bar{u}_i\varepsilon - \Gamma^{(\varepsilon)}\frac{d\varepsilon}{dx_i}) = \rho\left(C_{\varepsilon 1}S\varepsilon - C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\vartheta\varepsilon}}\right)$$

Nótese que esta ecuación contiene un término de producción diferente al resto de los modelos k- $\varepsilon$ , el cual no incluye la producción de  $k$ . Estas modificaciones le dan un desempeño muy superior para una gran cantidad de flujos en comparación con el modelo k- $\varepsilon$  estándar [32]. Por ello se decide realizar las simulaciones pertinentes con dicho modelo de turbulencia.

### 8.3.1.4. Modelo de turbulencia SST k- $\omega$

Se trata de una variación del modelo k- $\omega$  original que combina el modelo k- $\omega$  con una versión modificada del modelo k- $\varepsilon$ . En él se resuelven ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y para la razón específica de disipación ( $\omega$ ). Esta última viene definida por la siguiente expresión:

$$\omega = \frac{k}{\varepsilon}$$

Para flujo cercano a las paredes emplea el modelo k- $\omega$  original, mientras que para el flujo lejos de las paredes se utiliza el modelo modificado de k- $\varepsilon$ . Ambos modelos se mezclan en una función cuyo valor es uno cerca de las paredes (capa interna) y cero lejos de las mismas (capa externa) [32].

No obstante, el modelo k- $\omega$  es muy sensible a los valores iniciales asignados, por lo que su convergencia podría resultar complicada dificultando su estudio.



## 9. Análisis de alternativas

Para el estudio propuesto se ha escogido simular una geometría representativa compuesta por una tubería de longitud de 6 m y 0.3 m de diámetro. Inicialmente se ha intentado replicar el resultado obtenido por el estudio “Optimal design of ventilation grates through CFD simulations”, por lo que el diseño de rejillas escogido es un diseño simplificado de la rejilla de ventilación con dimensiones 600x100x120 mm. Se simplifica mediante la eliminación de la lama intermedia que podría provocar efectos que se estudiarán a continuación.

Tras ese análisis previo se realizan varias pruebas introduciendo modificaciones al diseño inicial, con las que se busca obtener el resultado deseado; que no es otro sino la determinación del comportamiento del aire fluyente a través de estos elementos terminales, para poder conseguir una configuración de rejilla óptima. Se recogen a continuación en las designadas alternativas o casos de estudio, entre otras, modificaciones en la geometría de las rejillas de ventilación y su disposición, posiciones de la lama central o adición de elementos que faciliten la transición del flujo.

### 9.1. Descripción del procedimiento

En este apartado se procede a describir los pasos ejecutados a lo largo del trabajo a fin de alcanzar la solución deseada mediante el software CFD. Todo ello se explicará de manera sintetizada para comprender el procedimiento general a la hora de tratar con un problema de mecánica de fluidos similar, ya que las simulaciones realizadas, aunque con ligeras diferencias vienen dadas por un tratamiento análogo.

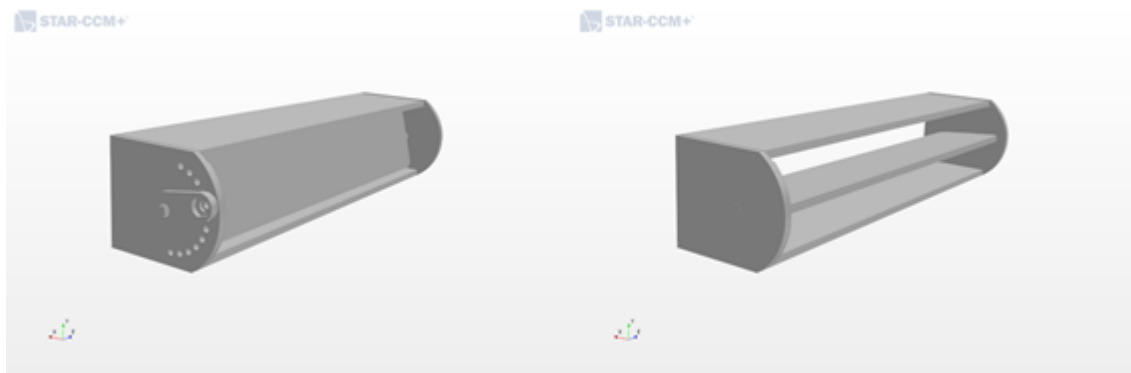
#### 9.1.1. Geometría

En primer lugar, se ha de diseñar la geometría adecuada para replicar de forma veraz el caso de estudio. Para la realización de la misma se dispone de geometrías detalladas de las rejillas realizadas por medio de un programa especializado para dichos fines, como lo es AutoCAD.

No obstante, al tratarse de un caso de estudio que involucra múltiples geometrías para adecuarse a varios sistemas de ventilación, la parte correspondiente a los conductos y demás elementos que conforman los mismos se diseña a partir de la herramienta 3D-CAD de la que dispone el

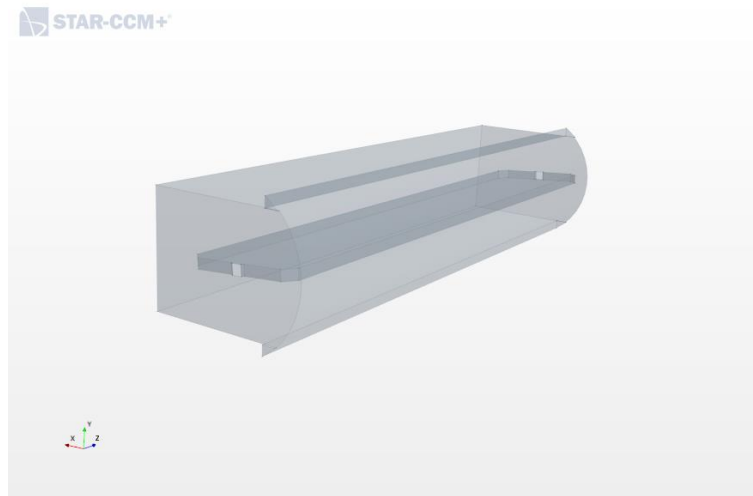
software. Esta facilita la conexión entre elementos, rotaciones, traslaciones y otras operaciones como creación de geometrías simples de forma intrínseca en el propio programa simulador.

Tras importar la geometría proporcionada correspondiente a la rejilla se aprecian ciertas imperfecciones del cuerpo, que presentan dificultades para poder trabajar con él. Como se puede observar en la Ilustración 31, la lama o pletina central de la rejilla se encuentra en una posición que imposibilita el flujo de salida del aire, por lo que se procede a rotar la misma hasta el ángulo deseado (variable entre casos de estudio). Otra reparación a realizar es el relleno de pequeños orificios y supresión de elementos redundantes, tales como manillas o acoples situados en la periferia de la rejilla.



*Ilustración 31: Geometría de una rejilla tras importación y tras reparación, de izquierda a derecha*

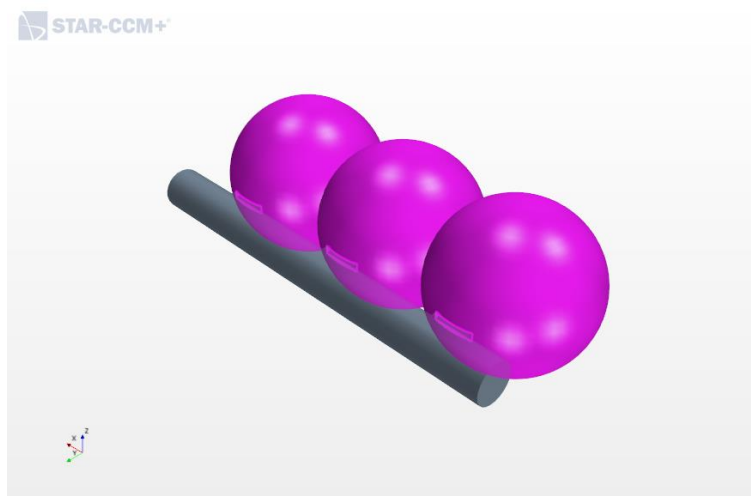
Estas operaciones pretenden preparar el cuerpo para la operación "Substract" o extracción del volumen; ya que el cuerpo de interés para trabajar mediante CFD no es el formado por el grupo de sólidos, sino el que ocupa o podría el fluido.



*Ilustración 32: Volumen fluido de una rejilla (vista transparente)*

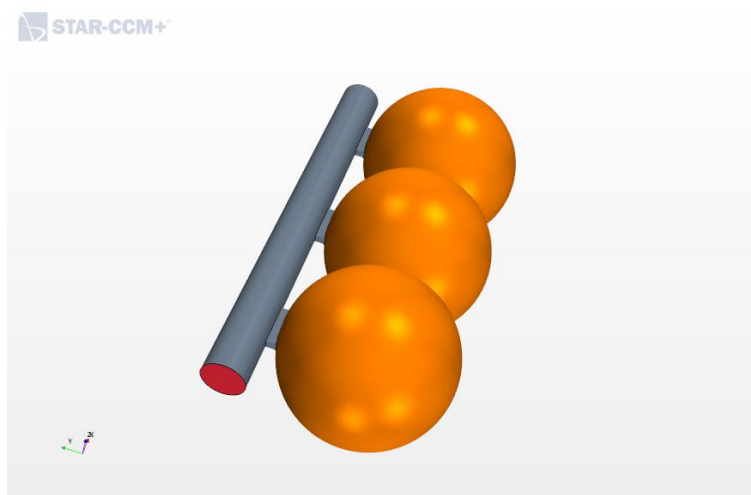
Una vez reparado y extraído el volumen fluido, se efectúa un patrón lineal con el que colocar el número deseado de rejillas a la distancia correspondiente en el lateral del conducto. Para los casos en los que se requiera modificar el tamaño de las mismas, dada la similitud entre diseños, se escala el cuerpo de forma anisótropa obteniendo una longitud diferente manteniendo el resto de propiedades intactas.

Con la finalidad de ahorrar en coste computacional y conseguir resultados aptos, se diseña una geometría esférica a la salida de cada rejilla. En contraposición a un volumen con forma de paralelepípedo, se requiere un número menor de celdas para reproducir el aire del interior de la estancia, a la par que ofrece buenos resultados al aplicar condiciones de contorno relativas a presiones. Se dice que la cantidad de celdas es menor porque no es necesario estudiar el aire inmediatamente próximo a las paredes de las rejillas por falta de interacción de este. El interés se centra en los flujos de aire en movimiento a la salida de estas, así como su interacción entre ellos conseguida con los contactos entre esferas.



*Ilustración 33: Geometría representativa del aire de la estancia*

Una vez finalizado el diseño, se crean partes de geometría (“New Geometry Part”) a partir de la geometría creada para discernir las superficies por las que está compuesta. De este modo, al asignar estas partes a regiones (“Assign Parts to Regions”) se estipula la posibilidad de fijar una condición de contorno por cada superficie creada; lo que es de gran ayuda, pues cada cuerpo dispone de zonas que ejercerán funciones como entradas, salidas u otras. Las regiones se definen como dominios matemáticos en los que poder configurar una red de celdas, y que junto con unas condiciones de contorno definidas de forma manual o por una función conforman el entorno de simulación.



*Ilustración 34: Ejemplo de diseño final del sistema de impulsión*



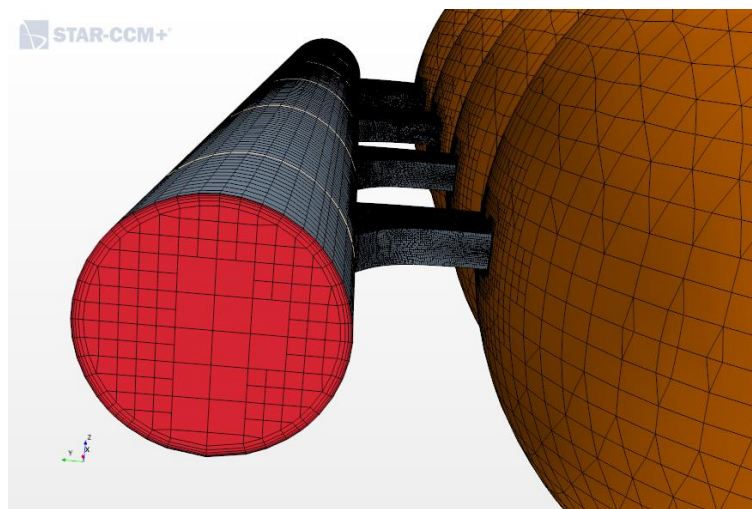
### 9.1.2. Mallado

Posteriormente se realiza la discretización o mallado de las regiones. Para llevar a cabo la tarea mencionada se opta por realizar un mallado por partes o también denominado "Parts Meshes". Esta metodología de discretizar el volumen de simulación permite un mayor control sobre el mallado y sus propiedades para una mejor adaptación a los cuerpos y optimización de los parámetros que conlleve un ahorro computacional.

Se opta por un tipo de celda hexaédrica que ofrece una mejor orientación de las celdas con respecto al flujo, cualidad que ayuda a la convergencia de la solución. Se requiere, sin embargo, de un mallado de mayor calidad en las superficies que actúen como pared para visualizar y capturar los efectos de turbulencia y otras propiedades que afectan en la capa límite del fluido. Con este propósito se integran las llamadas capas límite con el modelo "Prism Layer Mesher" que introduce celdas prismáticas de menor tamaño en las cercanías de las paredes. Esta característica es fundamental al tratar con un flujo interior que contiene contactos con las caras interiores de tuberías, conexiones y demás elementos presentes en sistemas de ventilación.

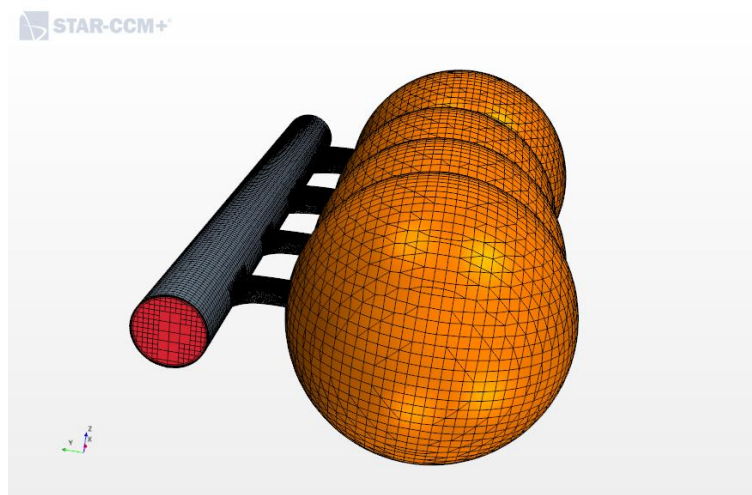
Se refina el mallado en los elementos de salida del aire únicamente, a fin de conseguir visualizar con un mayor grado de exactitud el flujo a través de estos con la economización del coste computacional que se logra al tener un mayor tamaño de celda en zonas donde no sea necesario ese nivel de precisión.

Ambas características se advierten en la Ilustración 35, en la cual las capas límite se vislumbran en la periferia de la sección tubular y el refinamiento de la malla se percibe en la diferencia de tamaño de las celdas de las rejillas.



*Ilustración 35: Detalles del mallado (capas límite y refinamiento de la malla)*

Como resultado se logran unos mallados con números de celdas comprendidos entre 100000 y 500000 para los diseños más simples. En los casos más complejos se alcanzan valores en torno a 1200000 para adaptarse a la elaborada e intrincada geometría. La Ilustración 36 muestra un ejemplo del resultado final del mallado, en concreto el mallado correspondiente al diseño con ramales redondeados.



*Ilustración 36: Ejemplo del mallado final (diseño con ramales redondeados)*

### 9.1.3. Modelos físicos

Considerando la naturaleza del problema y sus características se implementan y configuran los modelos físicos que se presentan en la Ilustración 37. Atendiendo

a los modelos escogidos el software introducirá y resolverá las correspondientes ecuaciones matemáticas de mecánica de fluidos para la consecución de la solución del problema.

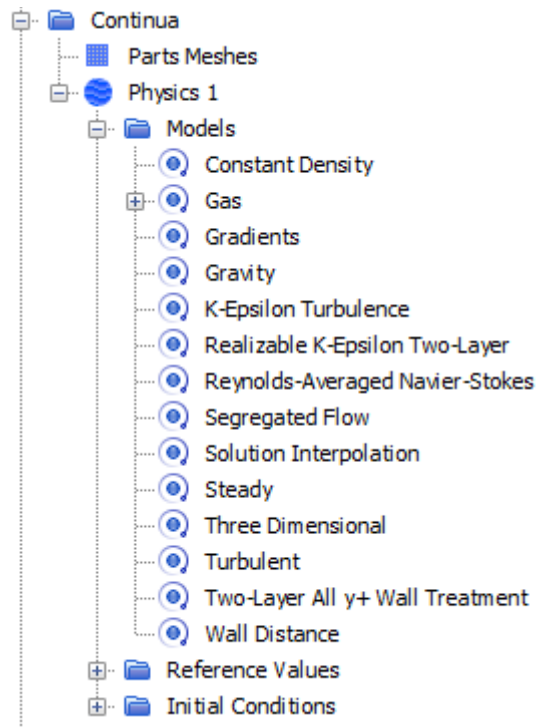


Ilustración 37: Modelos físicos seleccionados

A continuación se exponen los modelos físicos seleccionados:

- Se selecciona el modelo tridimensional en virtud de los cambios que se van a formar en el flujo, que a su vez alterarán el resultado en tres dimensiones.
- En lo que a modelos de tiempo respecta, se estima el problema como estacionario justificando una considerable independencia del resultado final frente al tiempo y por tanto despreciando su efecto. En el estudio en cuestión se busca una solución para una situación estable, desestimando cualquier fluctuación que pudiera ocurrir en el transcurso del funcionamiento (instantes de iniciación del sistema o apagado).
- En lo referente al fluido, se escoge el modelo de gas, por tratar únicamente con aire. A juzgar por las velocidades obtenidas a través del sistema de impulsión y el interior de las estancias, se considera como gas

cuya densidad y viscosidad se mantendrán constantes. Es por ello que se aplica el modelo de densidad constante, por no superarse el límite de compresibilidad del aire, otorgando un valor de  $1,18415 \text{ kg/m}^3$  y  $1,85508 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  a la densidad y viscosidad dinámica, respectivamente.

- Se opta por un “solver” segregado o método de resolución de flujo segregado por ser adecuado con fluidos incompresibles y por la ausencia de términos o variables energéticas. El procedimiento de resolución segregado calcula progresivamente las ecuaciones de momento, la ecuación de continuidad y las restantes ecuaciones (energía, turbulencia...) en todas las celdas al mismo tiempo. Posteriormente, actualiza los valores de las propiedades para cada una de ellas y resuelve nuevamente y de forma sucesiva hasta finalizar.
- Se concluye un régimen de flujo turbulento por efecto de darse un número de Reynolds superior a 4000. Para esta apreciación se ha tenido en cuenta la estimación inicial de velocidad de entrada, que para todos los casos superaría el valor mínimo para encontrar dicho régimen.

$$Re = \frac{U \cdot D_h \cdot \rho}{\mu} > 4000$$

$$U_{min.} > \frac{4000 \cdot 1,85508 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}}{0,3 \text{ m} \cdot 1,18415 \text{ kg/m}^3} = 0,2 \text{ m/s}$$

Donde  $Re$  representa al número adimensional de Reynolds,  $U$  la velocidad del fluido,  $D_h$  el diámetro hidráulico (que se corresponde con el diámetro al ser la sección circular),  $\rho$  la densidad del fluido y por último  $\mu$  la viscosidad dinámica.

Se comprueba de esta manera que, para el diámetro de tubería propuesto, la velocidad tiene que alcanzar un valor mínimo de  $0,2 \text{ m/s}$ ; condición que se cumple para cada uno de los casos.

- Para modelizar esta turbulencia se escoge el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  realizable por su notable robustez y estabilidad, aún con valores elevados de turbulencia. Su economía de cálculo junto con su precisión razonable y la mencionada robustez, que facilita la convergencia, lo convierten en un modelo ampliamente utilizado en el ámbito industrial.

- Finalmente, se añade el efecto gravitatorio en el eje Z para obtener resultados más realistas.

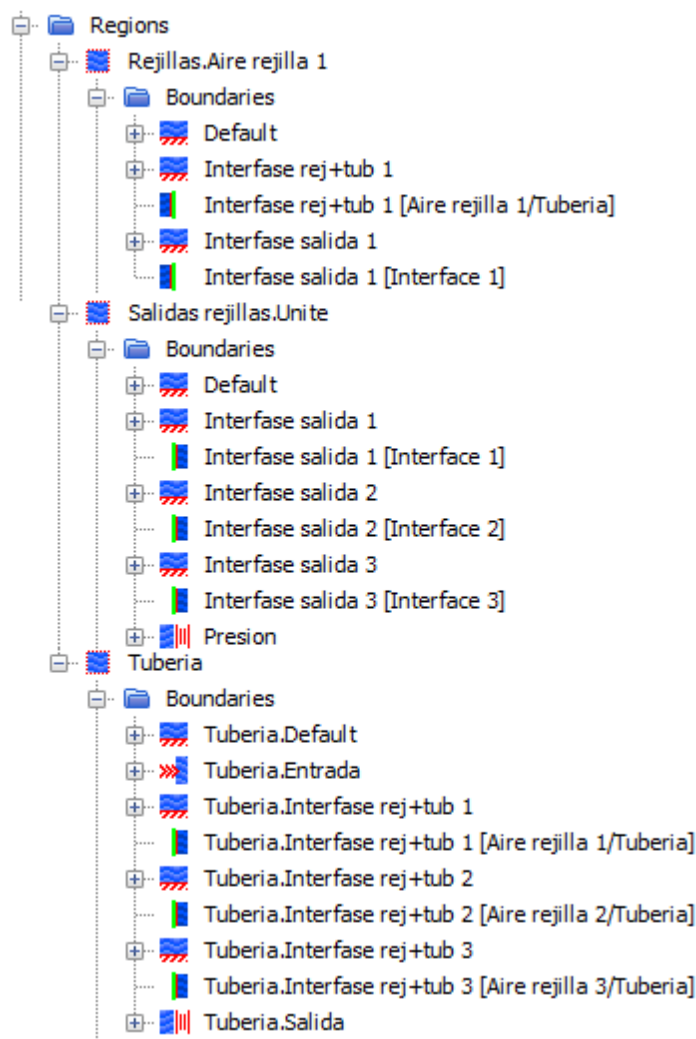
Se establecen de forma adicional los valores de las condiciones iniciales, así como los valores de referencia.

- Las condiciones iniciales son aquellas que el programa toma para comenzar a iterar y, por tanto, obtener la solución. Se aplican a algunas propiedades dependiendo de las condiciones de contorno aplicadas y conviene que sean cercanas a la solución para ahorrar tiempo y evitar problemas de convergencia.
- Los valores de referencia, como su propio nombre indica, fijan la referencia para el programa a la hora de introducir los datos referentes a unas propiedades determinadas. Es decir, manteniendo un valor de 0 Pa como valor inicial, si se configurara el valor de referencia de la presión a presión atmosférica (101325 Pa) el resultado de la condición inicial de presión se establecería como presión atmosférica.

#### 9.1.4. Condiciones de contorno

El conjunto de valores atribuidos a las magnitudes físicas que definen las condiciones de contorno conforma el último paso previo al comienzo de la simulación. Estos determinan el resultado final, a diferencia de las condiciones iniciales, y por ende es decisivo especificar sus valores con exactitud.

Las condiciones de contorno citadas con anterioridad reciben los valores especificados para cada uno de los diseños o casos propuestos. No obstante, y de forma representativa, se muestra un ejemplo de las condiciones impuestas en la Ilustración 38.



*Ilustración 38: Ejemplo de condiciones de contorno impuestas*

Se divisan principalmente cuatro clases de condiciones de contorno, de las cuales tan solo reciben valor numérico dos de ellas. Estas son las condiciones de velocidad y presión, impuestas tanto en tubería como en las esferas finales. Si bien las condiciones de pared o "wall" e interfase admiten la configuración de algunas de sus propiedades, se desestima llevar a cabo dicha alteración considerando correcta la configuración por defecto. La primera simula la superficie de un sólido u obstáculo, mientras que la segunda habilita el contacto entre las regiones creadas.

### 9.1.5. Simulación y visualización de resultados

Para dar comienzo a la simulación se inicializa la misma y se activa el comando "Run" para comenzar la ejecución del programa.

Con el propósito de analizar el resultado y las variaciones de las propiedades del fluido en el entorno de simulación configurado, se crean una serie de representaciones gráficas llamadas "Scenes". En ellas se muestran no solo los campos de magnitudes como velocidad o presión (por medio de vectores o escalares), sino también representaciones de geometría o mallado. Se realizan tantas escenas como se considere oportuno para observar la solución proporcionada por el software CFD y juzgar el resultado. Se muestra en la Ilustración 39 una agrupación de diversas escenas creadas durante el transcurso del proceso de simulación:

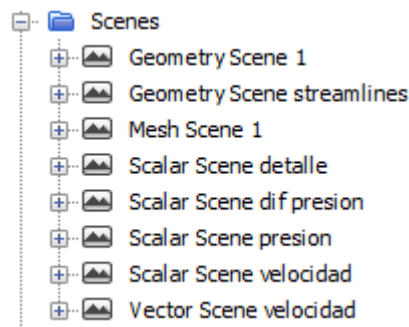


Ilustración 39: Conjunto de escenas creadas

Con los resultados obtenidos se procede al postprocesado o extracción de conclusiones con ayuda de estos elementos en los que predominan los vectores, escalares o líneas de corriente, entre otros, en las secciones, planos o elementos adicionales creados.

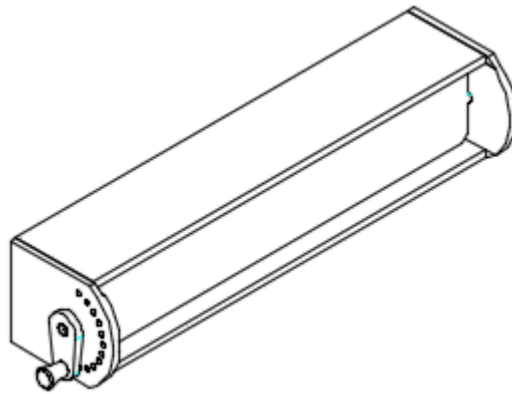
## 9.2. Geometrías y mallados

A continuación se muestran las geometrías de los casos propuestos con las correspondientes distribuciones de las rejillas a lo largo de la tubería. Se añade también una ilustración del mallado utilizado para dichos casos; aparece la ilustración de un único mallado, ya que el resto de las simulaciones tienen un mallado similar con parámetros semejantes. Cabe mencionar que hay una



pequeña varianza en el número de celdas, pero esto se debe a la diferencia de tamaño de las propias rejillas.

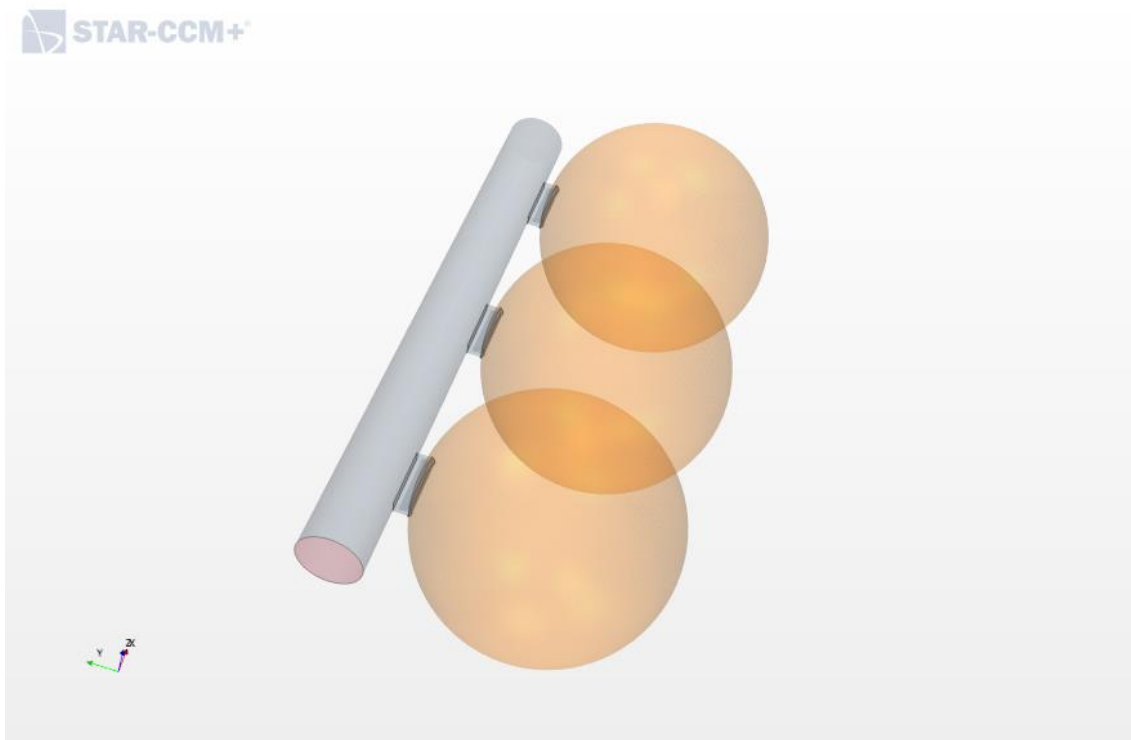
Como se ha mencionado previamente, la tubería tiene una sección circular de 0.3 m de diámetro y una longitud de 6 m. Estos parámetros se mantienen constantes a lo largo de las simulaciones. Las rejillas tienen la siguiente geometría en la que tanto la altura como la profundidad se mantienen constantes. La única diferencia entre cada una de las rejillas estudiadas es la longitud de la rejilla (y la lama consecuentemente), que varía entre valores aproximados a 200, 600 y 800 mm.



*Ilustración 40: Geometría del tipo de rejilla*

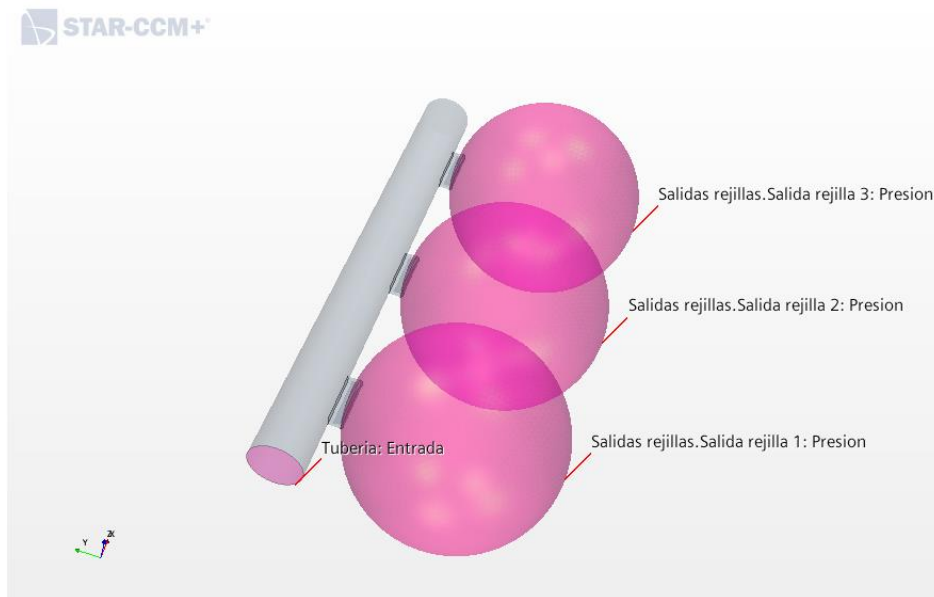
A la salida de las rejillas se ha situado un conjunto de esferas que representan el aire en la habitación. La elección de esta figura se basa en la optimización del número de celdas de la simulación al completo sin perder veracidad en los resultados.





*Ilustración 41: Disposición general de la geometría*

La inserción del aire al entorno de simulación se produce a través de la sección circular representada con color rojo (*Tubería: Entrada* en la Ilustración 42) de forma perpendicular a esta y con una velocidad de 10 m/s. Su salida se realiza mediante las rejillas dispuestas para finalmente abandonar el entorno a través de las esferas a una presión de 0 Pa (*Salidas rejillas.Salida rejilla: Presión* en la Ilustración 42). El extremo contrario a la entrada se encuentra tapado, representativo del final de una tubería. Las condiciones de contorno aplicadas, por lo tanto, serán de velocidad y presión para entradas y salidas, respectivamente y de pared para las superficies restantes.



*Ilustración 42: Condiciones de contorno sobre geometría*

En las siguientes ilustraciones se muestran las disposiciones de las rejillas de ventilación, siendo el sentido del flujo de aire de derecha a izquierda. Se ha escogido un número mayor de rejillas para el caso de la rejilla de longitud de 200 mm con un total de 5 rejillas por las 3 de las simulaciones correspondientes a las rejillas de tamaño 600 y 800 mm. La causa se debe a que al reducir tanto la sección de salida las velocidades en ellas podrían ser excesivas y provocar un impacto acústico elevado con unos resultados no deseados, por lo que se decide aumentar el número de salidas manteniendo un distanciamiento proporcional a su tamaño.

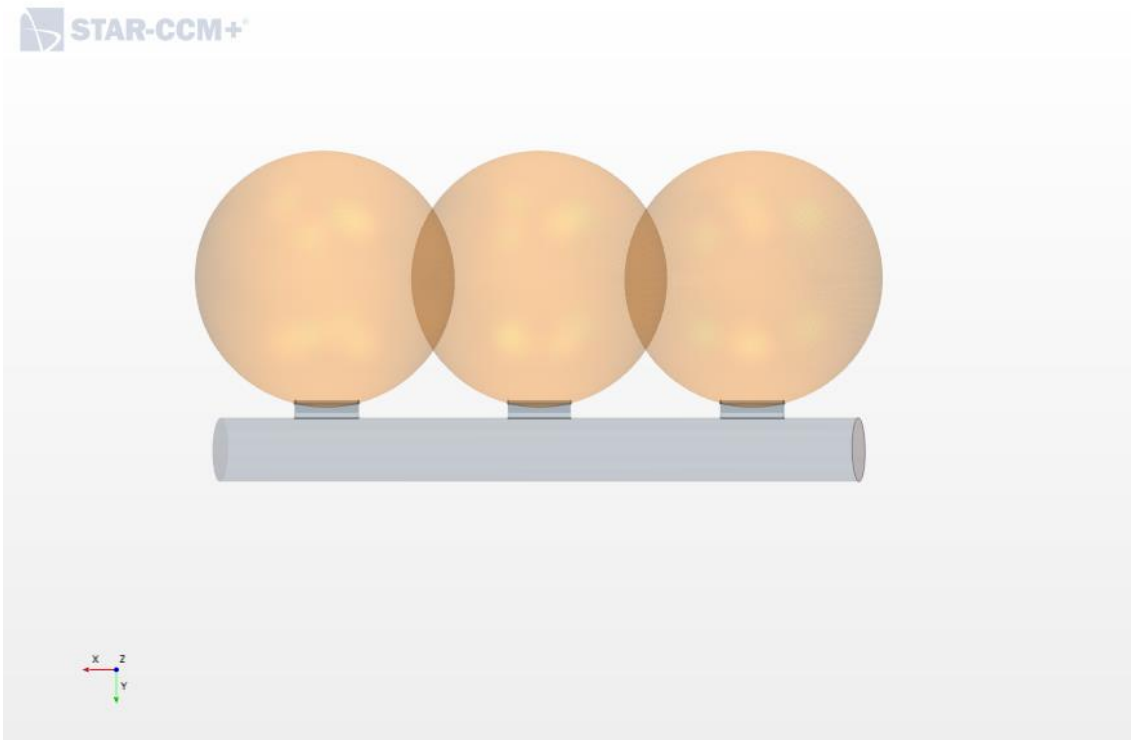


Ilustración 43: Disposición de las rejillas de 600 mm de longitud (vista en planta)

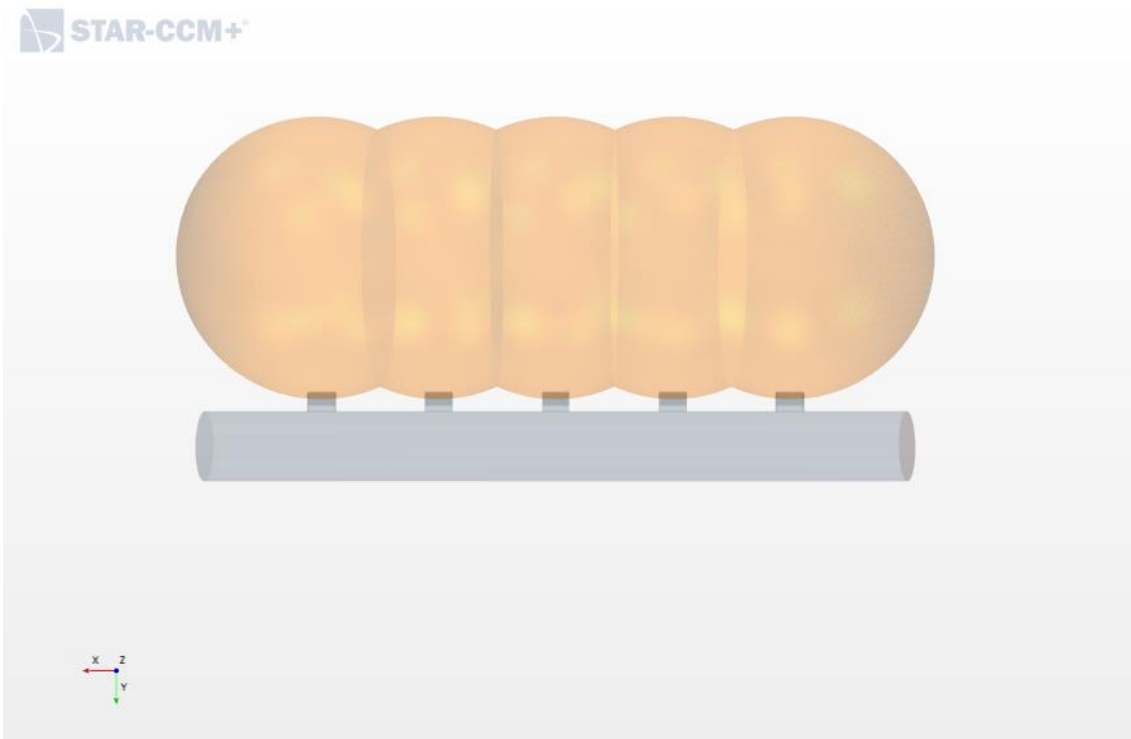
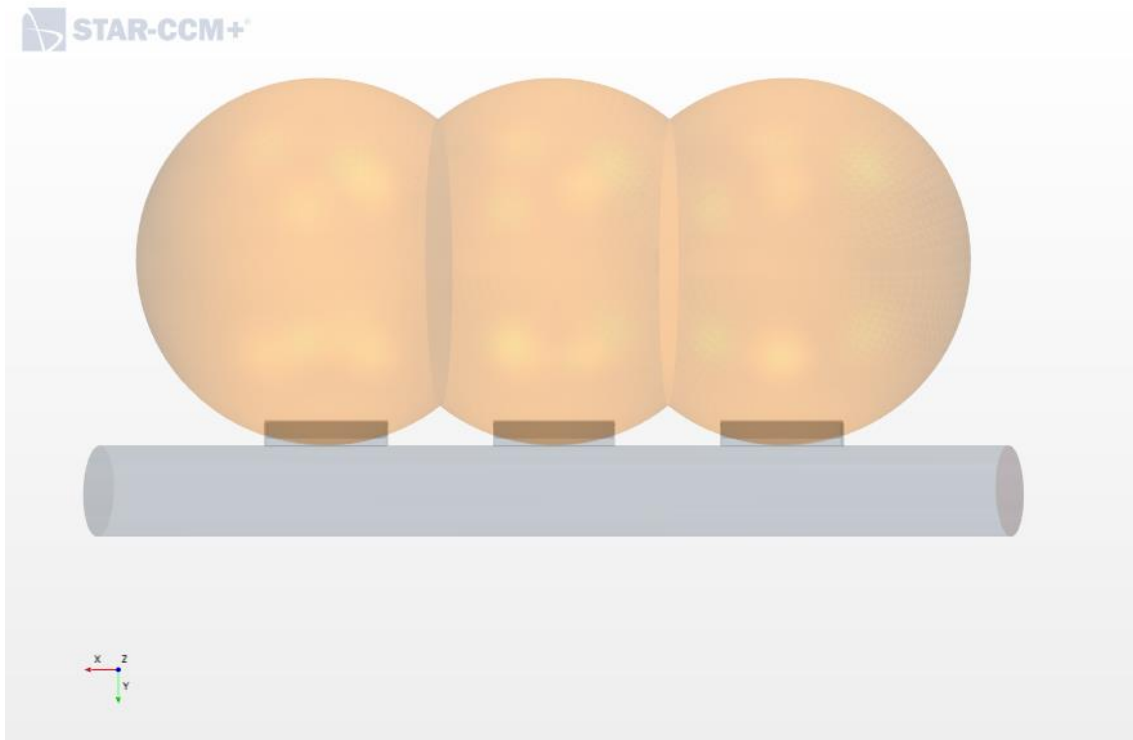


Ilustración 44: Disposición de las rejillas de 200 mm de longitud (vista en planta)



*Ilustración 45: Disposición de las rejillas de 800 mm de longitud (vista en planta)*

Como se ha citado con anterioridad, con el objeto de comprobar el comportamiento de la rejilla para varias posiciones de la lama, se diferencian dos casos para cada estilo de rejilla. En ellos se sitúa la lama en una posición cercana a la horizontal para luego rotarla a un ángulo cercano a los  $45^\circ$ . Posteriormente se muestran dichas posiciones de la lama mediante detalles de las rejillas (Ilustración 46 e Ilustración 47, respectivamente).

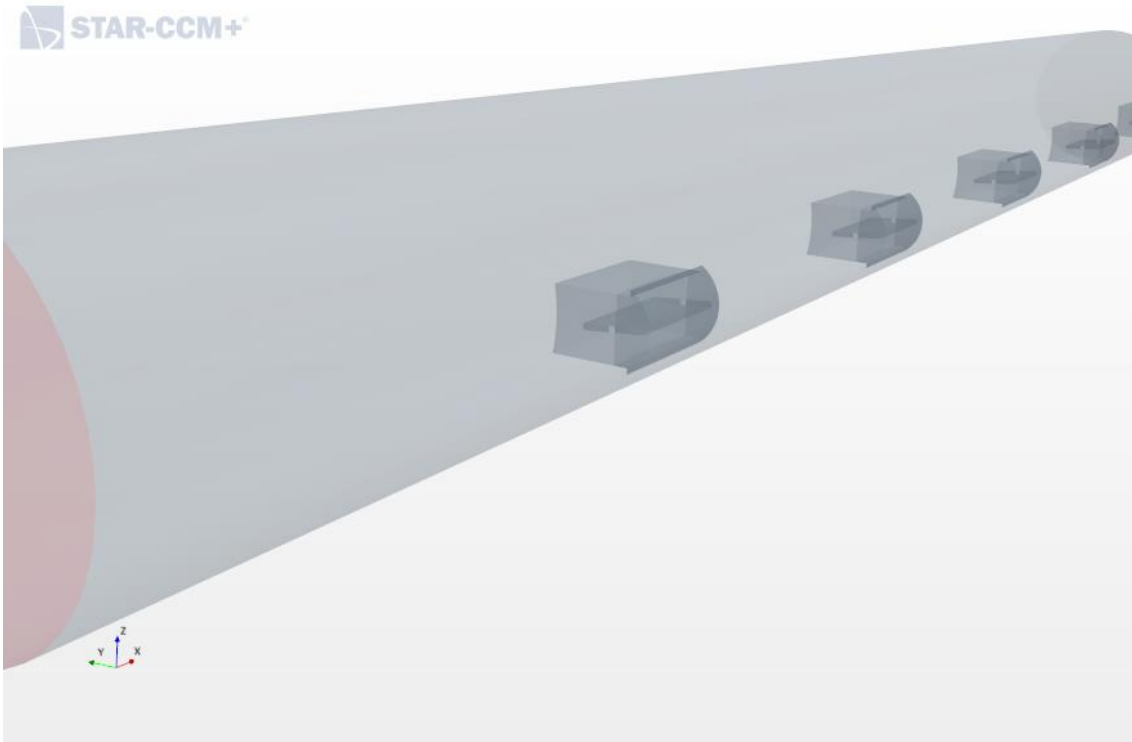


Ilustración 46: Detalle de la posición de la lama (posición horizontal)

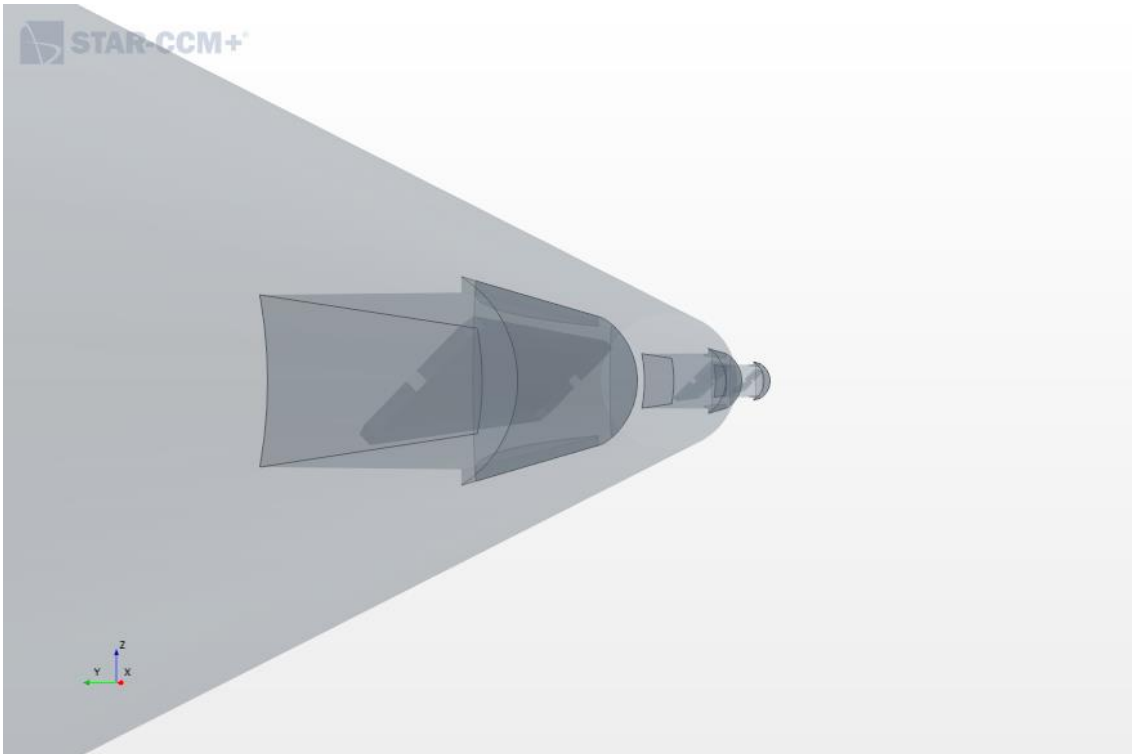
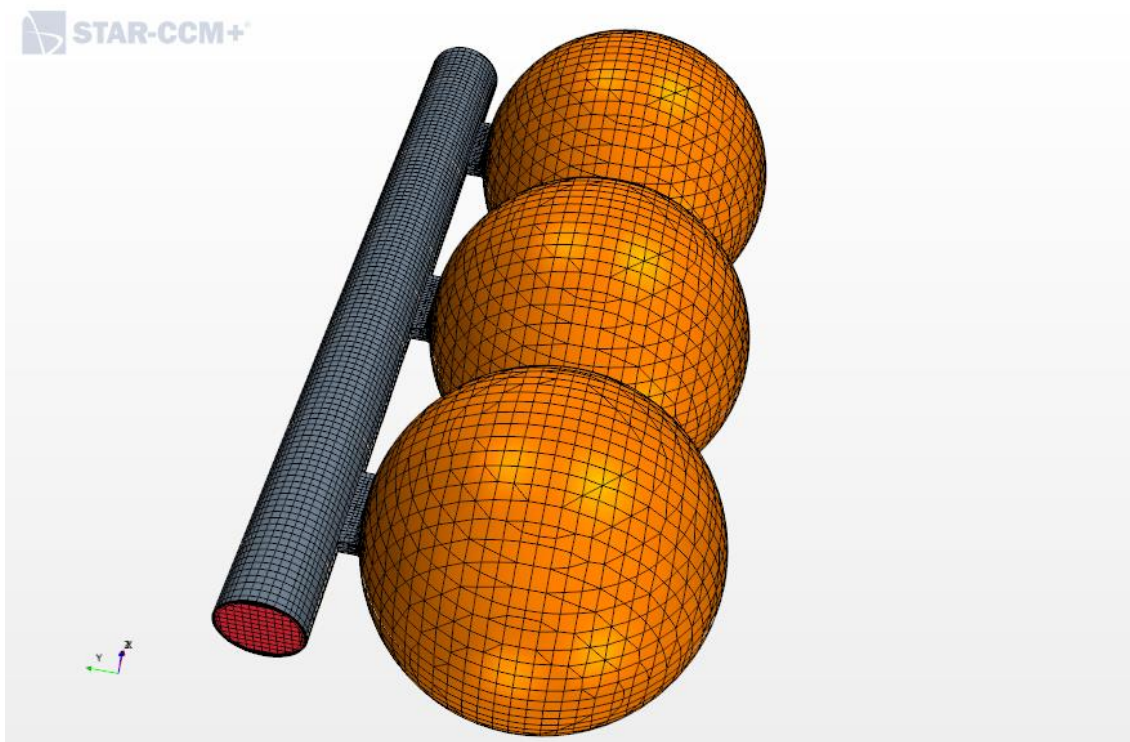


Ilustración 47: Detalle de la posición de la lama (posición 45°)

Para resolver estos problemas mediante mecánica de fluidos computacional o CFD (acrónimo en inglés para Computational Fluid Dynamics) se discretizan las geometrías en un conjunto de celdas formando un mallado que se representa a continuación (Ilustración 48).



*Ilustración 48: Vista general del mallado*

Mediante el modelo de mallado Trimmed Cell Mesher de STAR-CCM+ se consigue un conjunto de mallados para todas las simulaciones que contiene un número de celdas suficientes para obtener unas conclusiones generales de todas ellas. Ya que un mallado de excesivas celdas tendría un coste computacional elevadísimo para estudiar tantos casos. Es por esto que el rango de número de celdas oscila entre 100700 y 480000 celdas (variación debida sobre todo al tamaño de las rejillas a discretizar). Este proceso se ha realizado con un tamaño base de las celdas de 0.1 m y 5 capas límite para obtener mejores resultados en celdas cercanas a paredes. De forma adicional se decide mallar con mayor precisión la zona que rodea a las rejillas de mayores dimensiones; ambos detalles se muestran en estas ilustraciones (ilustraciones 49 y 50):

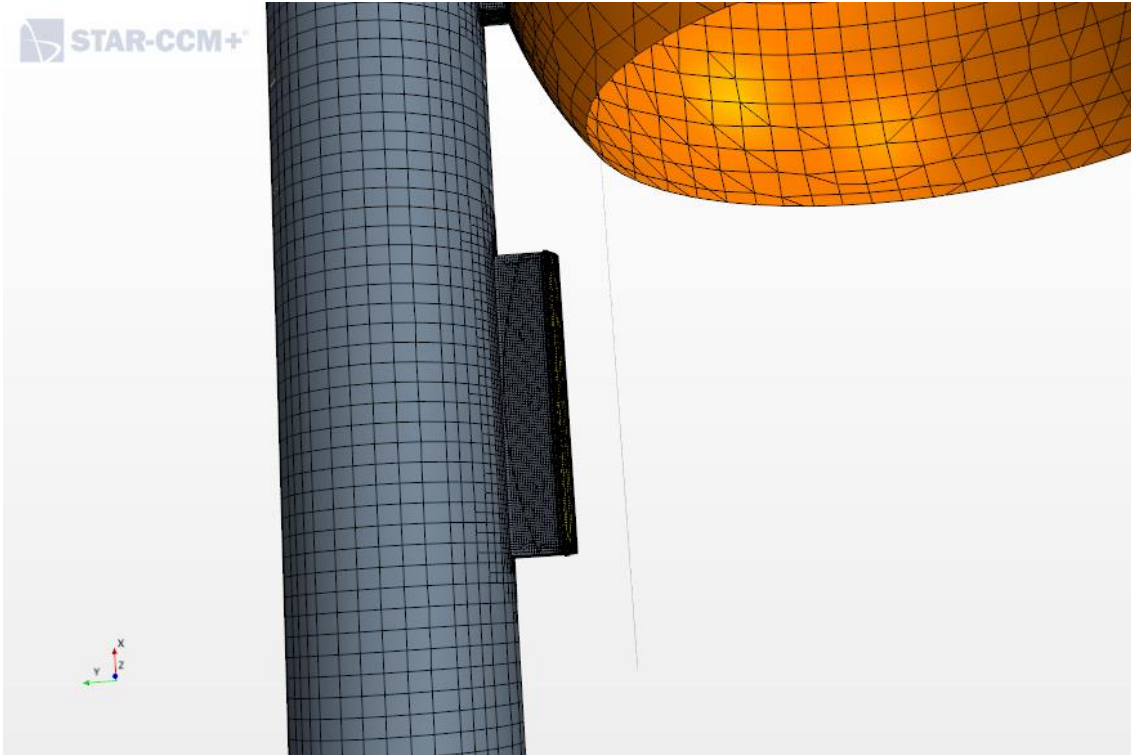


Ilustración 49: Detalle del mallado más fino en las rejillas

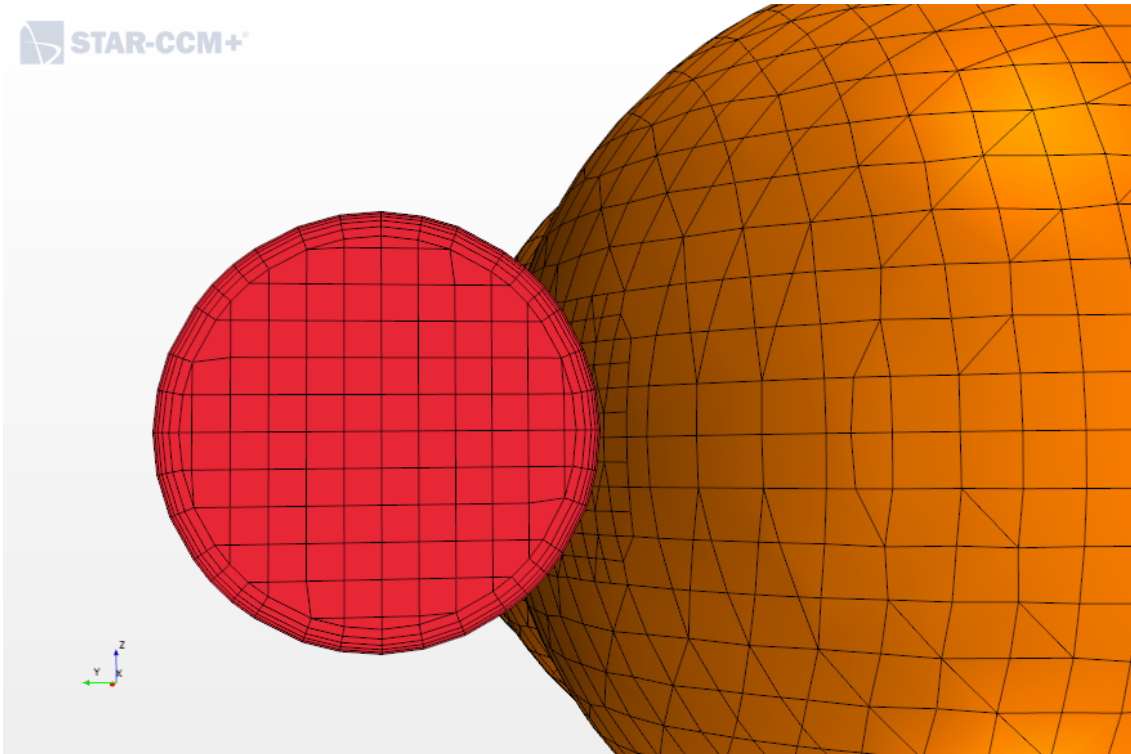


Ilustración 50: Detalle de las capas límite en la tubería



### 9.3. Tubería con extremo opuesto abierto

A fin de verificar que los resultados obtenidos en las simulaciones previas son extrapolables a las primeras rejillas, se decide realizar nuevas simulaciones estimando una presión de salida en el extremo opuesto de la tubería. Con ello se pretende forzar un flujo de salida a través del ducto, obteniendo de esta manera los resultados pertenecientes a un tramo de tubería más próximo al sistema de impulsión (y, por ende, a rejillas situadas al comienzo de la misma).

La tarea de escoger una presión de salida es compleja, ya que se desconoce la distribución de presión en este elemento. Consecuentemente, se estima una presión ligeramente inferior a la conseguida en el final de la tubería para cada caso. Dicha elección genera un flujo de salida y un cambio del comportamiento del aire en las rejillas.

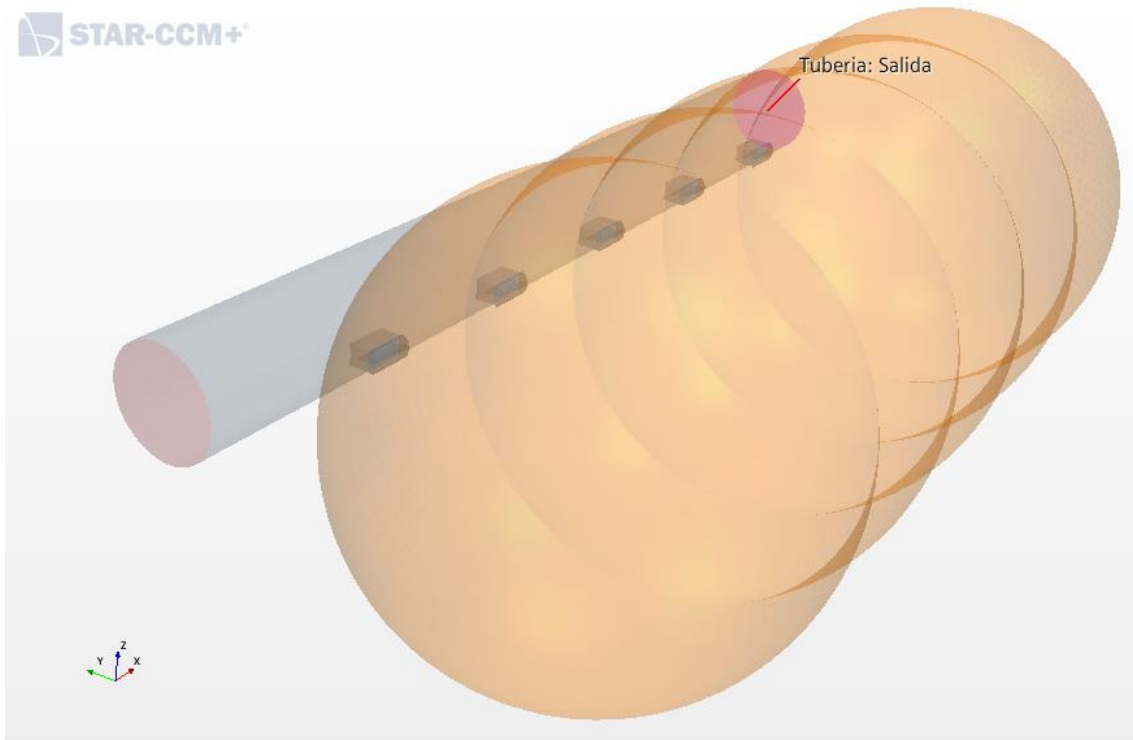


Ilustración 51: Geometría y ubicación de la condición de contorno de salida. Caso de tubería abierta (longitud de 200 mm)



Pressure - Properties ×	
[-] Properties	
Method	Constant ▾
Value	500.0 Pa ...
Dimensions	Pressure ...

Ilustración 52: Condición de contorno de salida impuesta (longitud de 200 mm)

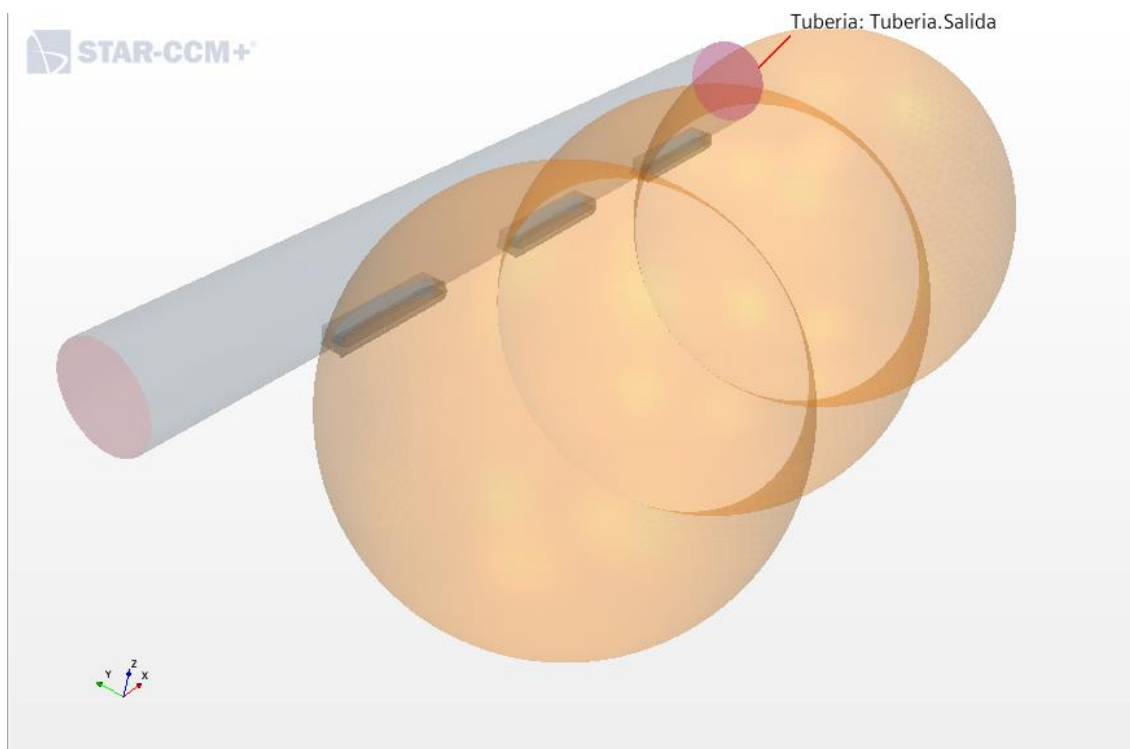


Ilustración 53: Geometría y ubicación de la condición de contorno de salida. Caso de tubería abierta (longitud de 800 mm)

Pressure - Properties ×	
[-] Properties	
Method	Constant ▾
Value	150.0 Pa ...
Dimensions	Pressure ...

Ilustración 54: Condición de contorno de salida impuesta (longitud de 800 mm)

Los parámetros de la tubería se mantienen constantes con respecto a las simulaciones realizadas con anterioridad; es decir, tiene una sección circular de 0.3 m de diámetro y una longitud de 6 m. Se utiliza el mismo diseño de rejilla, y

en este caso se escogen las longitudes de 200 y 800 mm para mostrar el efecto de una longitud mayor y menor en los cambios propuestos.

La inserción del aire al entorno de simulación se produce a través de la sección circular representada con color rojo de forma perpendicular a esta y con una velocidad de 10 m/s. Su salida se realiza mediante las rejillas dispuestas para finalmente abandonar el entorno a través de las esferas a una presión de 0 Pa. El extremo contrario a la entrada se encuentra abierto, lo que significa que parte del flujo de aire abandonaría el entorno de simulación a través de la tubería. Esto representaría a un tramo de sistema de impulsión, que proseguiría más adelante pudiendo repetirse el mismo tramo o dando pie a una distribución de otro edificio u otra sección.

#### 9.4. Diseño con rejillas de longitud variable

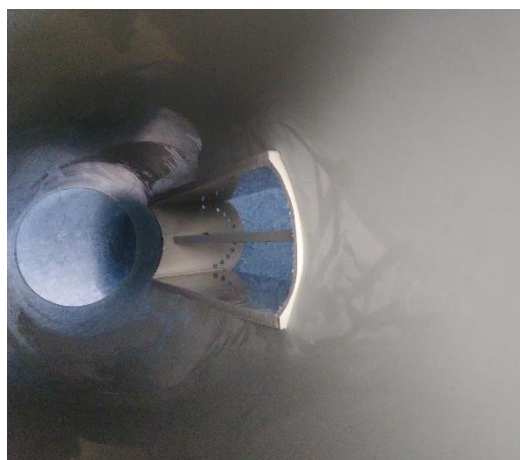
Esta alternativa pretende explotar los posibles beneficios de cada configuración de las rejillas anteriormente examinadas. Se incorporan diferentes longitudes de rejilla en una misma configuración (con una posición de la lama cercana a la horizontal para crear la menor turbulencia posible) buscando equilibrar el sistema en su conjunto.

Se examina la opción de introducir o alterar la entrada a las rejillas una vez abandonan el ducto para dirigirse al exterior, con la finalidad de comprender el comportamiento del flujo en este tramo y su influencia en los diseños. Esta idea se aplica en el diseño con paso aumentado mencionado con anterioridad para cotejar sus resultados y verificar la efectividad de sus aportes.

#### 9.5. Transiciones suavizadas (boca acampanada)

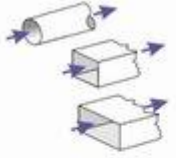
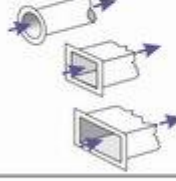
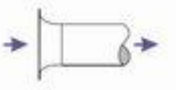
Otra alternativa de estudio consta en sustituir los cambios de ángulos abruptos a la entrada de las aberturas. De este modo se pretende reducir las pérdidas de carga de estos componentes, ya que las conexiones de las rejillas (con sección rectangular) con el conducto (de sección circular) obstaculizan una transición fluida del aire a través de las mismas.

Las conexiones directas actualmente instaladas en numerosas instalaciones contienen estas características, claramente visibles en la Ilustración 55, en la que se muestra la vista interior de dicha conexión en el prototipo proporcionado por el CABB.



*Ilustración 55: Vista interior de la conexión conducto-rejilla del prototipo proporcionado por el CABB*

Se propone una entrada redondeada que permita que el flujo se adhiera a las paredes interiores de la rejilla de modo que facilite su paso y se limiten las perturbaciones o posibles turbulencias. Dada la geometría de la misma se pasa a denominar “boca acampanada” a este elemento, cuyo coeficiente de pérdidas se muestra a continuación junto con otros tipos de conexiones Ilustración 56:

Hood type	Description	Hood entry loss coefficient (K)
	Plain opening	0.93
	Flanged opening	0.49
	Bell mouth inlet	0.04

*Ilustración 56: Coeficiente de pérdidas de carga para diferentes conexiones [33]*

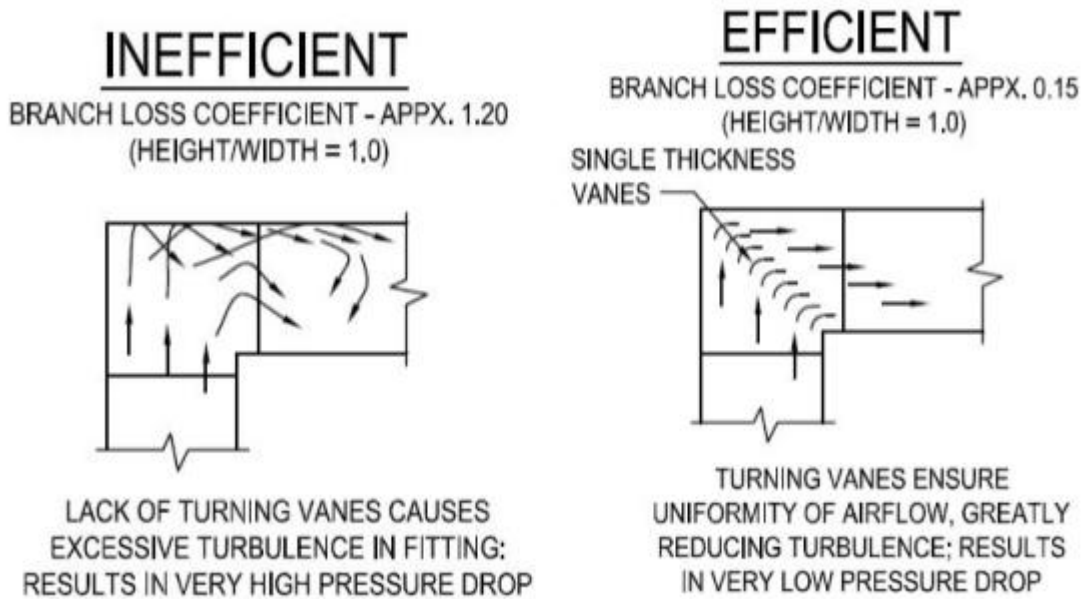
## 9.6. Direccionadores de flujo en el interior del ducto

En busca de contrarrestar el efecto del flujo temprano, causa principal del desvío, se plantea el empleo de elementos adicionales en el interior del conducto que apoyándose en su geometría corrijan el mismo. Este flujo, denominado así por ser el saliente en primer lugar por la rejilla, contiene un fuerte componente axial que repercute directamente en la direccionalidad del aire que sale posteriormente. Así pues, se estudia introducir dos elementos que denominaremos a partir de ahora como direccionadores de flujo, en virtud de la función que desempeñan:

- Deflectores o "turning vanes"
- Malla perforada con geometría direccionadora

Los deflectores son elementos comúnmente utilizados en cambios de direcciones bruscos para evitar grandes turbulencias que provoquen pérdidas de carga excesivas. Habitualmente presentes en codos de 90° en conductos de sección rectangulares, su función principal es la de laminar el flujo de aire para obtener una mayor uniformidad del mismo.

Al circular por un conducto sin estos elementos, al producirse un cambio abrupto de dirección el impacto producido en las paredes del ducto es elevado, lo que a su vez resulta en grandes pérdidas de carga para reorientar el aire fluyente. La adición de estos elementos con la orientación adecuada reduce el impacto del fluido y consigue reconducir el mismo a lo largo del trayecto evadiendo la formación de grandes turbulencias.



*Ilustración 57: Trayectoria del aire en conducto rectangular con y sin deflectores [34]*

Estos elementos ofrecen una fácil instalación conductos rectangulares, siendo un proceso más arduo en el caso de un conducto circular, ya que estos requieren una adaptación de la geometría y unos railes de montaje más complejos. En la Ilustración 58 se observa un ejemplo proporcionado por el fabricante GEBHARDT-STAHL [35]:



*Ilustración 58: Ejemplo de instalación de deflectores*

Se decide probar esta tecnología para redirigir el flujo de la forma correcta a la salida de las rejillas, a pesar de la recomendación de no utilización en ubicaciones intermedias de los conductos. Se desaconseja ubicar deflectores a la entrada de ramales o aberturas por su gran influencia en el flujo interno [34]. La

perturbación generada es significativa además de aumentar en gran medida las pérdidas de carga generadas, tal y como se visualiza en la Ilustración 59.

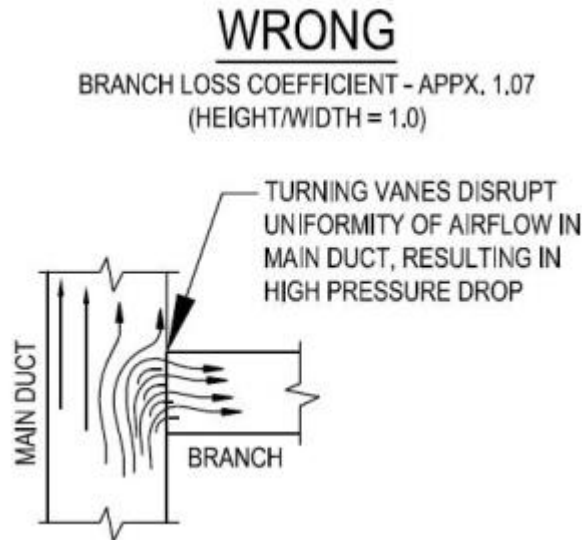


Ilustración 59: Empleo incorrecto de deflectores en ramales o aberturas [34]

No obstante, y con la finalidad de verificar estas tendencias, se construye un modelo computacional que contiene un elemento con la siguiente geometría dentro del conducto para la realización de simulaciones. Su sección tiene una forma análoga a la de un álabe para facilitar el paso del fluido e intentar interferir lo menos posible en el flujo en un tramo infinitamente posterior. Su fabricación se habría de realizar en base polipropileno, ya que un material metálico no soportaría los compuestos a base de azufre presentes en el entorno (como,  $\text{SH}_2$ ).

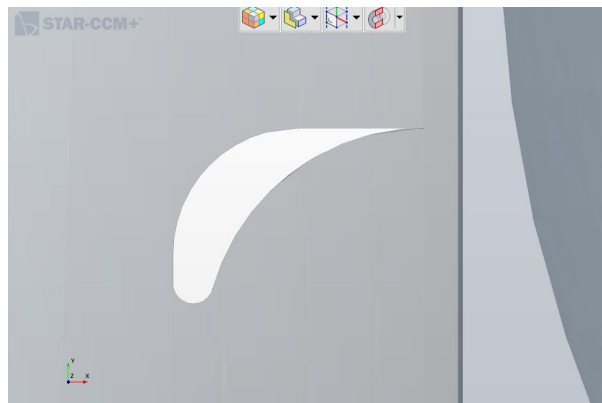
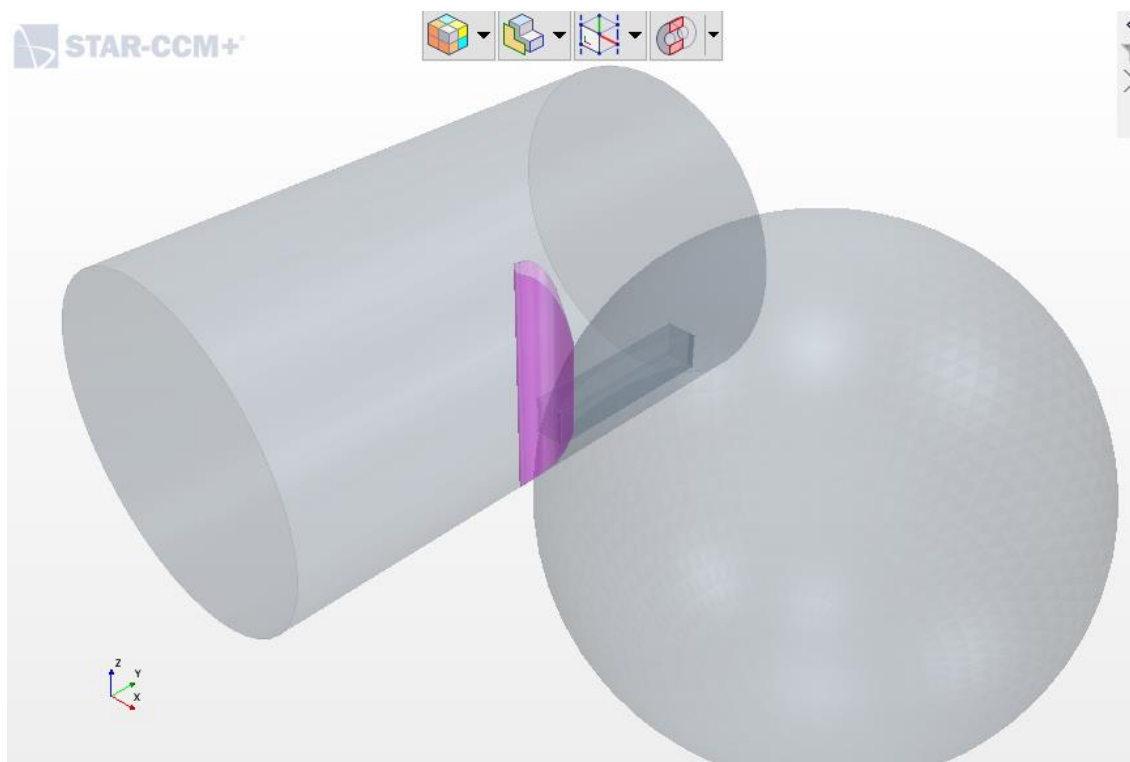


Ilustración 60: Sección del deflector propuesto

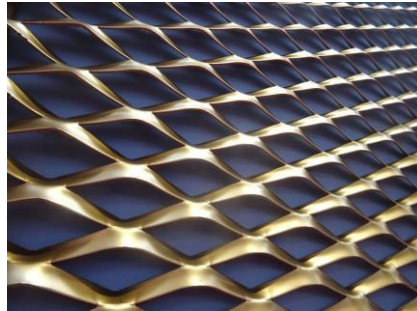
Su posición en la tubería se determina de modo que actúe de la manera más efectiva, siempre y cuando obstaculice lo menos posible. Este compromiso se resuelve emplazando este cerca de la abertura, presentando un área inferior en el interior del ducto sobre la que afectará de forma negativa, y simultáneamente desviando únicamente la fracción del flujo de interés, en este caso el correspondiente al flujo temprano. Esta se visualiza en la Ilustración 61:



*Ilustración 61: Emplazamiento del deflector (resaltado en rosa)*

En cuanto a la malla perforada, se busca conseguir ese mismo efecto situando una malla con una geometría direccionadora en lugar del mencionado deflector. La instalación de esta sería más simple que la del deflector, aunque la fabricación de la misma podría conllevar mayores problemas al poseer un diseño complejo. La idea se basa en utilizar una lámina del mismo material empleado en tuberías (polipropileno por las características del entorno) que contenga agujeros con una inclinación tal que permita el cambio de trayectoria del aire. De esta manera, se facilitaría la transición hacia las rejillas de salida para rehusar o paliar el efecto del flujo temprano.





*Ilustración 62: Ejemplo de geometría de la malla perforada*

El intrincado diseño de este componente no solo dificulta su creación a nivel computacional, sino que también compromete su coste computacional, lo que se traduciría en una necesidad superior de tiempo al simular para considerar los resultados obtenidos veraces. Esto ralentizaría la velocidad de simulado y su convergencia, por lo que se descarta este escenario. En su lugar se decide modelizar la malla como un medio poroso, dotándolo de las características físicas pertinentes para que se comporte como tal. Como la finalidad de la malla es dirigir el aire en la dirección perforada, el modelo se ubica en una dirección diagonal en el interior del ducto, de modo que un alto porcentaje del aire que lo circule discurra en la dirección normal a esta (dirección de las perforaciones). El situar el modelo en este emplazamiento y dirección en el entorno de simulación no significa que el elemento real se deba situar de dicho modo; simplemente se trata de una estrategia para replicar la actuación de la malla (situada en realidad ocupando la sección circular).

Se decide realizar una simulación con una geometría en forma de disco que ocupe la sección al completo (Ilustración 63), y posteriormente, con el objetivo de incidir menos sobre el flujo interno y reducir la caída de presión al atravesarla se prueba con otra geometría de malla parcial (Ilustración 64). Esta actuaría sobre la fracción de aire más próxima a la abertura pudiendo permitir que el flujo restante atravesará el tramo de tubería en cuestión sufriendo menos impacto.



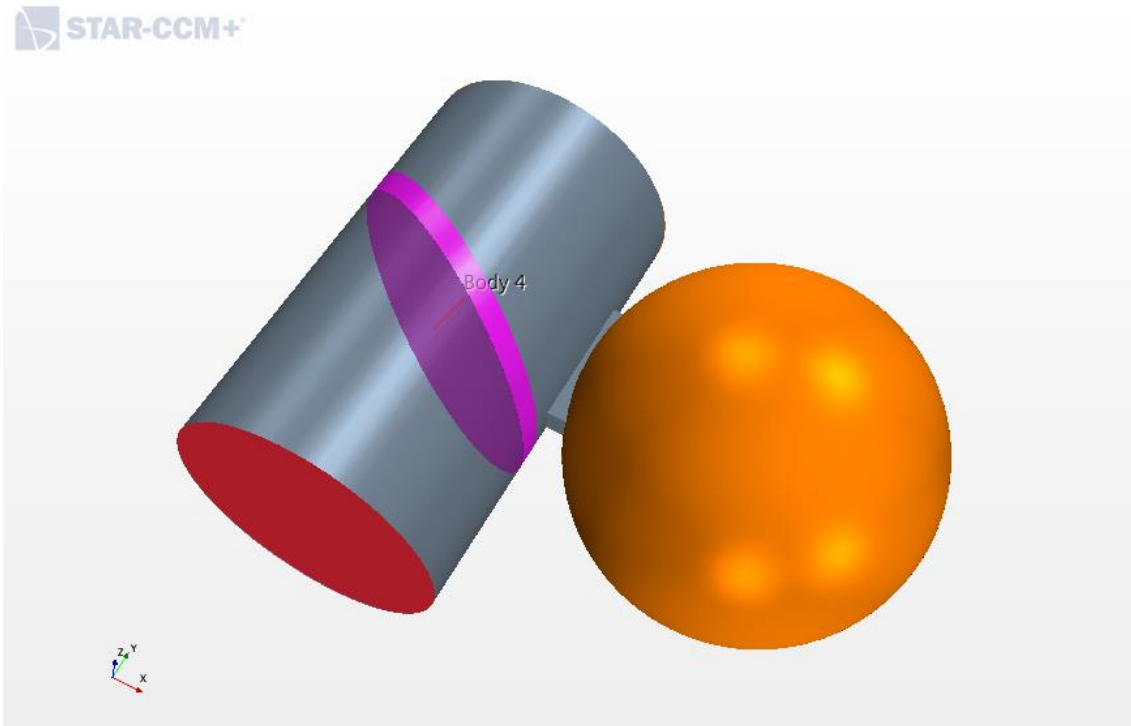


Ilustración 63: Geometría representativa de la malla perforada (disco)

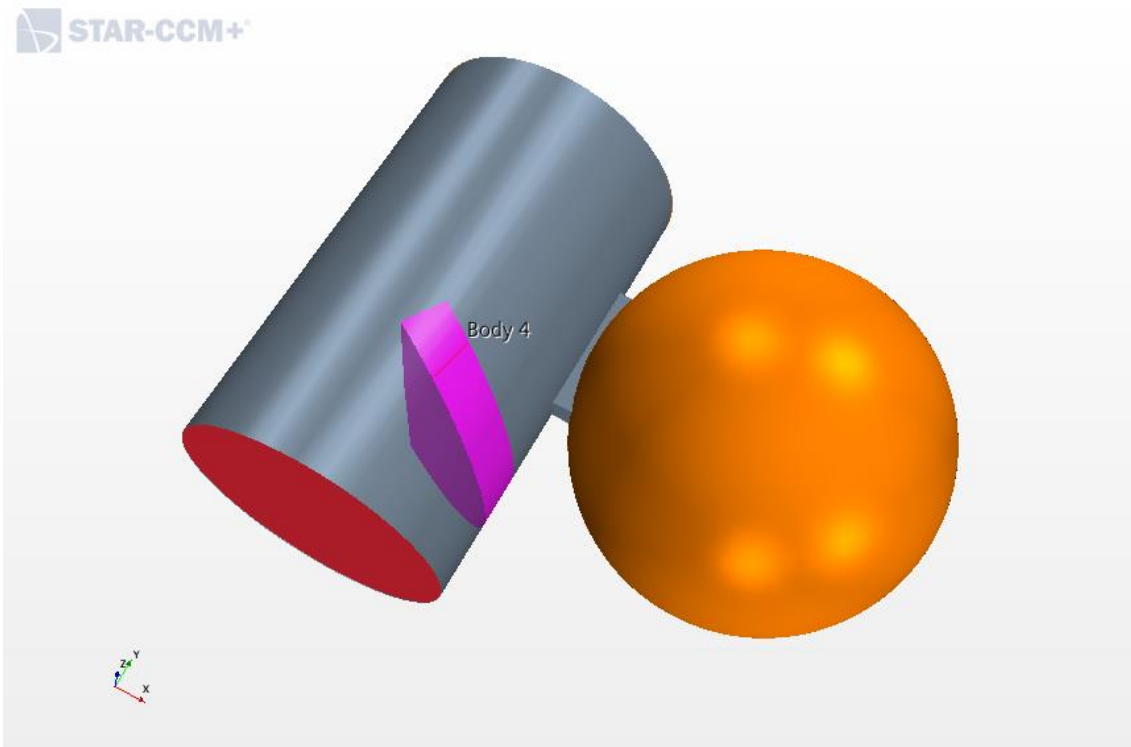
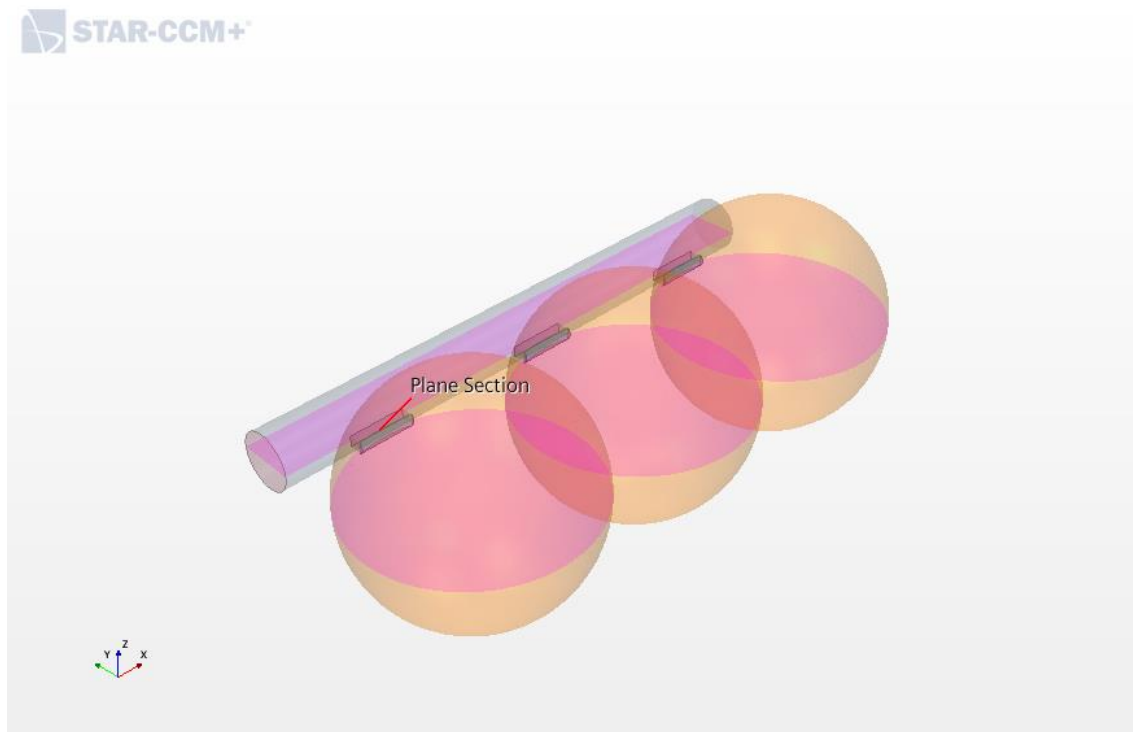


Ilustración 64: Geometría representativa de la malla perforada (disco parcial)

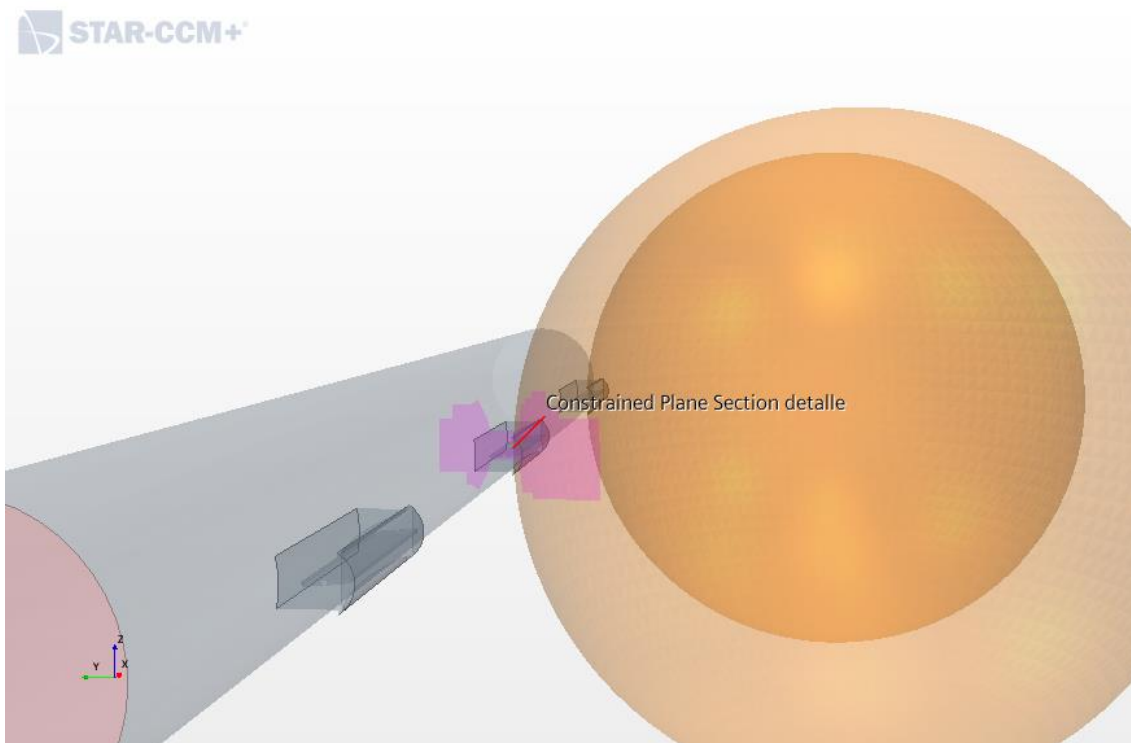
## 10. Análisis de resultados

En este apartado se recogen los resultados correspondientes a cada una de las alternativas o casos de estudio propuestos.

Para su visualización se han realizado una serie de planos auxiliares que se representan en las siguientes ilustraciones (ilustraciones 65 y 66). Se trata de un plano central que corta todos los elementos por la mitad y una sección transversal para visualizar mejor el flujo a través de una de las rejillas.



*Ilustración 65: Plano central auxiliar para visualizar resultados*



*Ilustración 66: Sección auxiliar de la rejilla 2 para visualizar resultados*

En cada uno de los casos se visualiza la trayectoria del aire mediante vectores de velocidad y líneas de flujo. Se visualiza el campo de presiones en la tubería y se verifica la caída de presión que provoca la rejilla con todos sus componentes. Para la homogeneización del flujo se calculan las velocidades medias a las salidas de las rejillas y su caudal, buscando valores lo más similares posibles entre ellas.

## 10.1. Rejilla de 600 mm sin lama

Comenzando por la rejilla de 600 mm sin lama, para obtener una primera impresión del comportamiento del aire sin obstáculos que influyan en la salida, se consigue visualizar que el ángulo de salida en las rejillas es más pronunciado en las rejillas iniciales. Este efecto se va apaciguando a medida que se avanza en la tubería, dicho efecto se debe a la sobrepresión generada al final de la tubería, pues el aire remanente choca contra la pared generando torbellinos y una presión que empuja al aire hacia la rejilla, provocando una disminución en el componente axial del aire saliente.

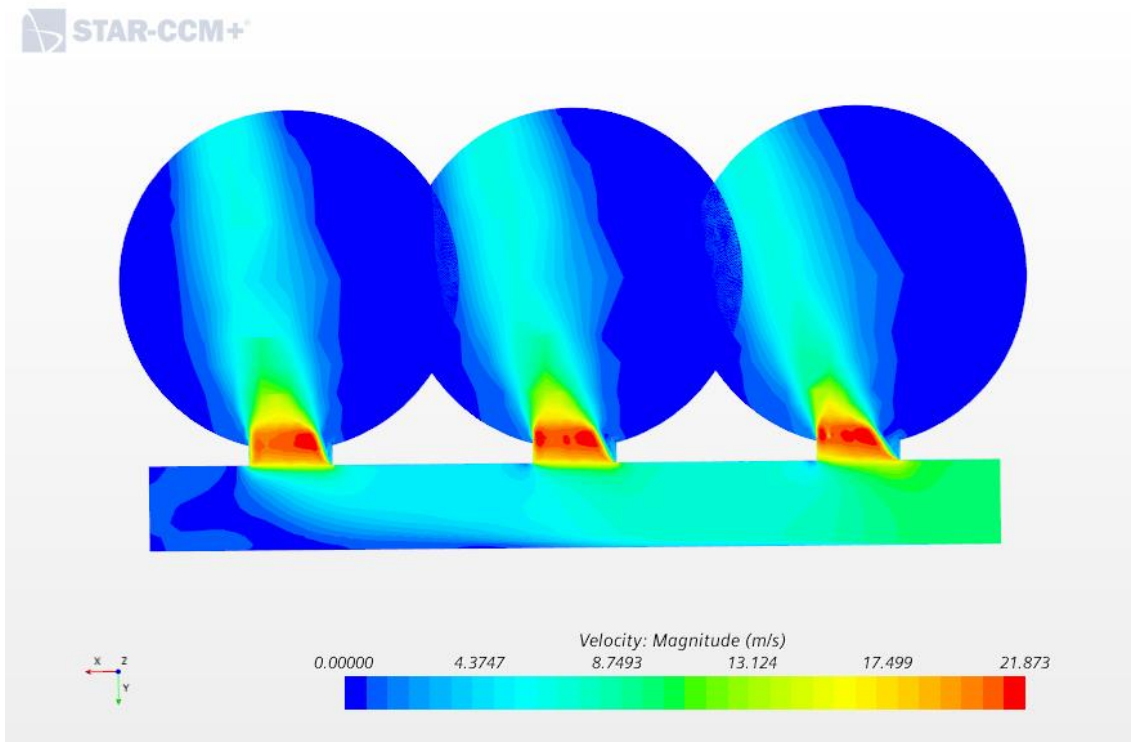
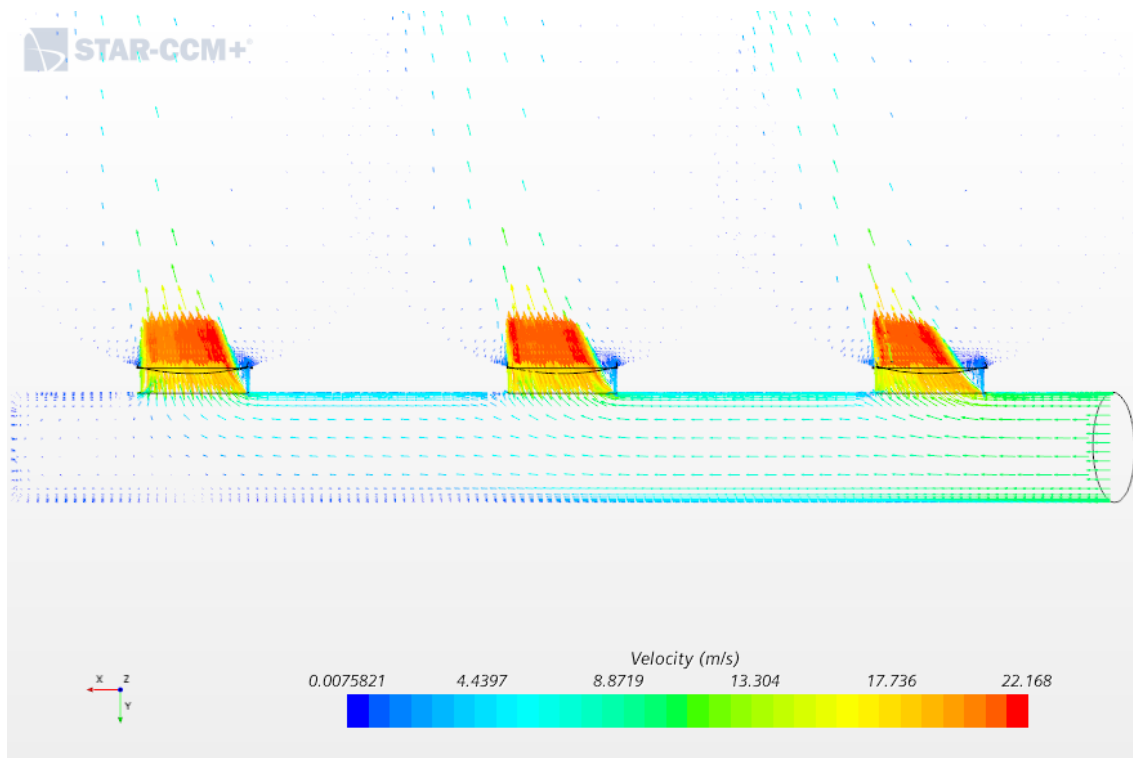


Ilustración 67: Campo de velocidades con la rejilla de 600 mm sin lama



*Ilustración 68: Vectores de velocidad con la rejilla de 600 mm sin lama*

Es evidente la disminución de la velocidad a la vez que se avanza en la longitud de la tubería, ya que una parte del flujo atraviesa una salida (sección de paso de la rejilla) por lo que el flujo aminora su velocidad. Sin embargo, en la primera rejilla, representativa en una instalación de aquellas que no tienen ningún obstáculo que obstruya o influya sobre la salida del aire, se puede ver cómo el efecto del flujo temprano condiciona la trayectoria del flujo direccionándolo en un ángulo mucho más pronunciado que en el resto. El componente axial de este sumado al aumento de velocidad por la disminución de la sección de paso (apertura lateral de la rejilla) generan dicho efecto.

Las trayectorias pueden visualizarse también con las llamadas streamlines o líneas de flujo. En estas ilustraciones (ilustraciones 69 y 70) se observa también el cambio de dirección dentro del tubo que genera la salida de aire por una abertura. Es decir, una partícula situada en la parte central de la sección circular sufrirá una atracción a la pared sin llegar a salir por la primera rejilla, pero la situará más cerca de la segunda abertura. Cabe destacar también la posibilidad de ver los torbellinos mencionados con anterioridad al final de la tubería, causantes del aumento de presión en esta zona.

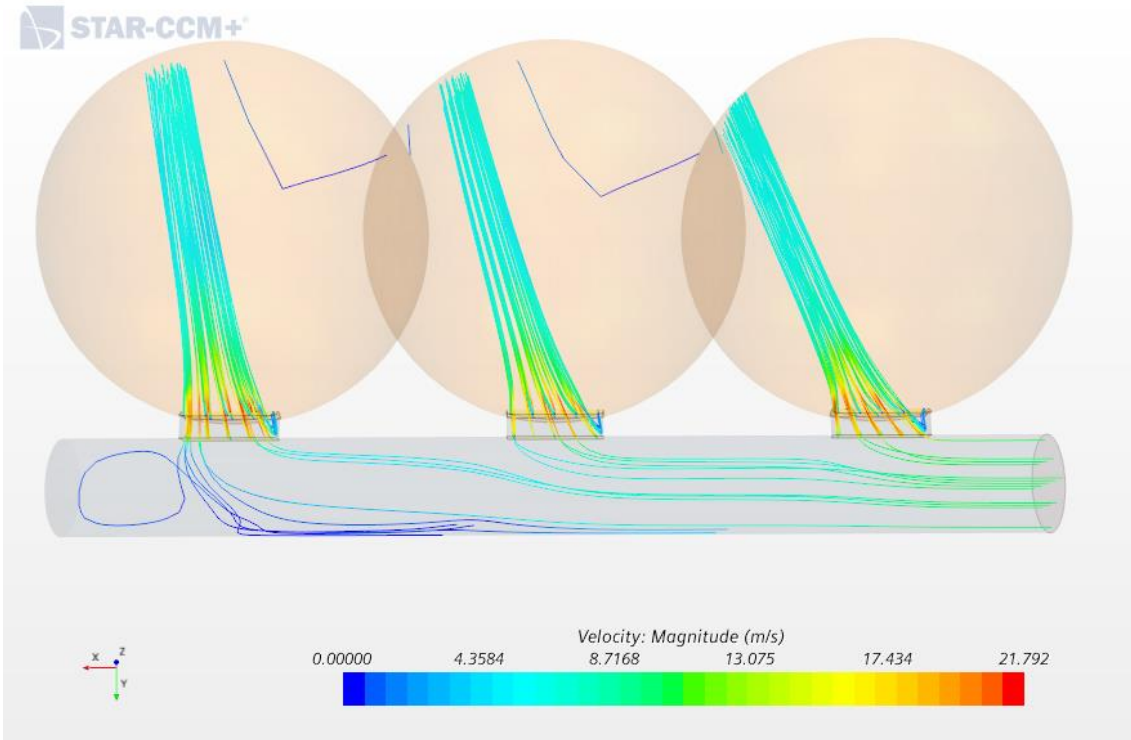


Ilustración 69: Trayectoria del flujo de aire (vista en planta)

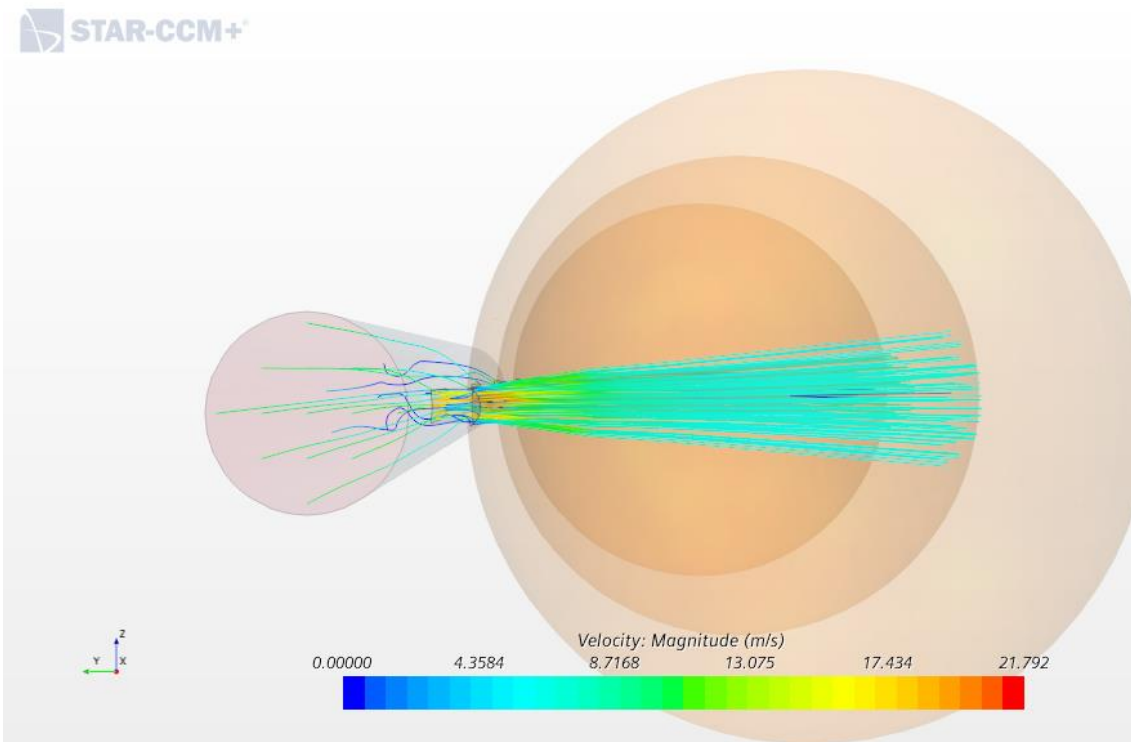
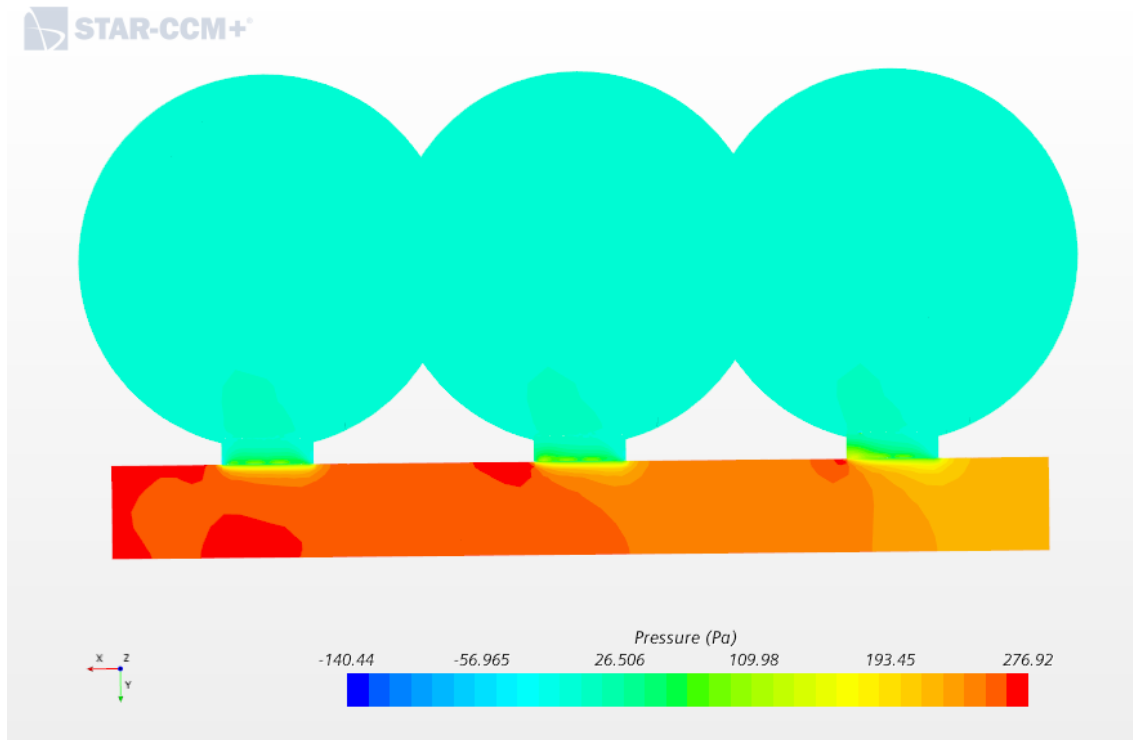


Ilustración 70: Trayectoria del flujo de aire (vista en perfil)

El valor de las presiones dentro de la tubería aumenta según se avanza en ella, consecuencia del extremo cerrado de la misma.



*Ilustración 71: Campo de presiones (rejilla de 600 mm sin lama)*

Finalmente, en la siguiente vista de la sección transversal de la rejilla se vislumbra una distribución horizontal de los vectores de velocidad al no encontrar obstáculo alguno (Ilustración 72). Al introducir la lama intermedia, el flujo no seguirá una distribución tan uniforme, con una variación ligera con una lama horizontal; pues una pequeña fracción del aire saliente chocará contra este elemento.

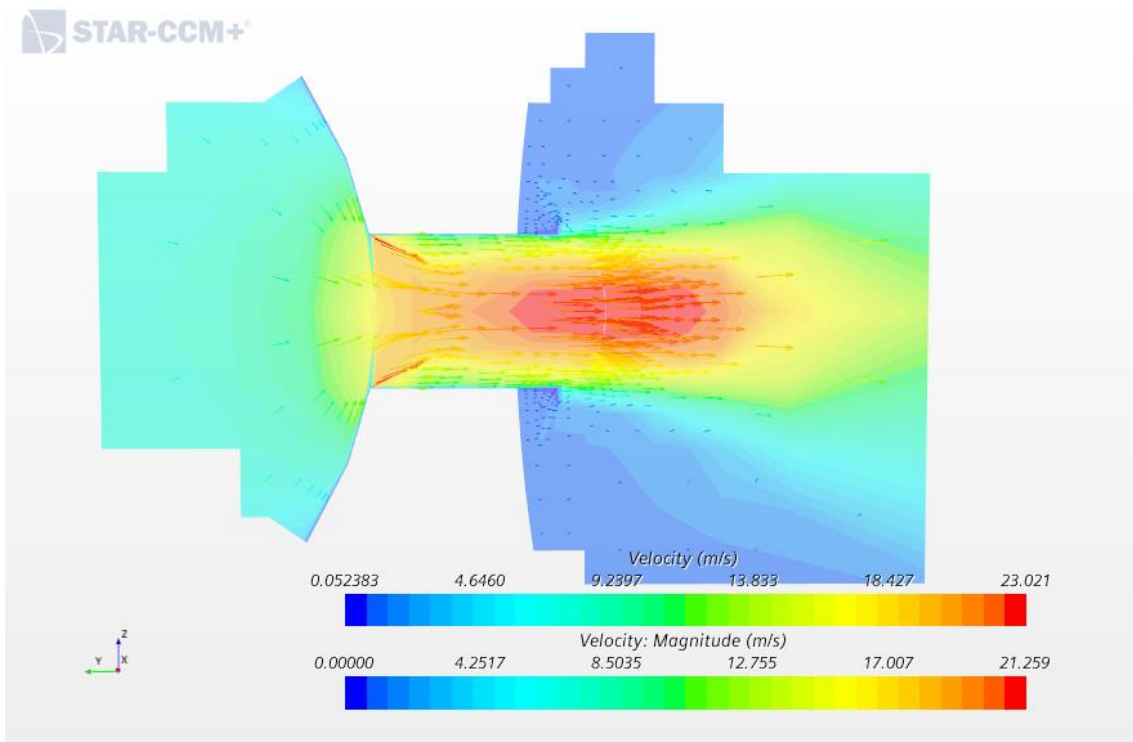
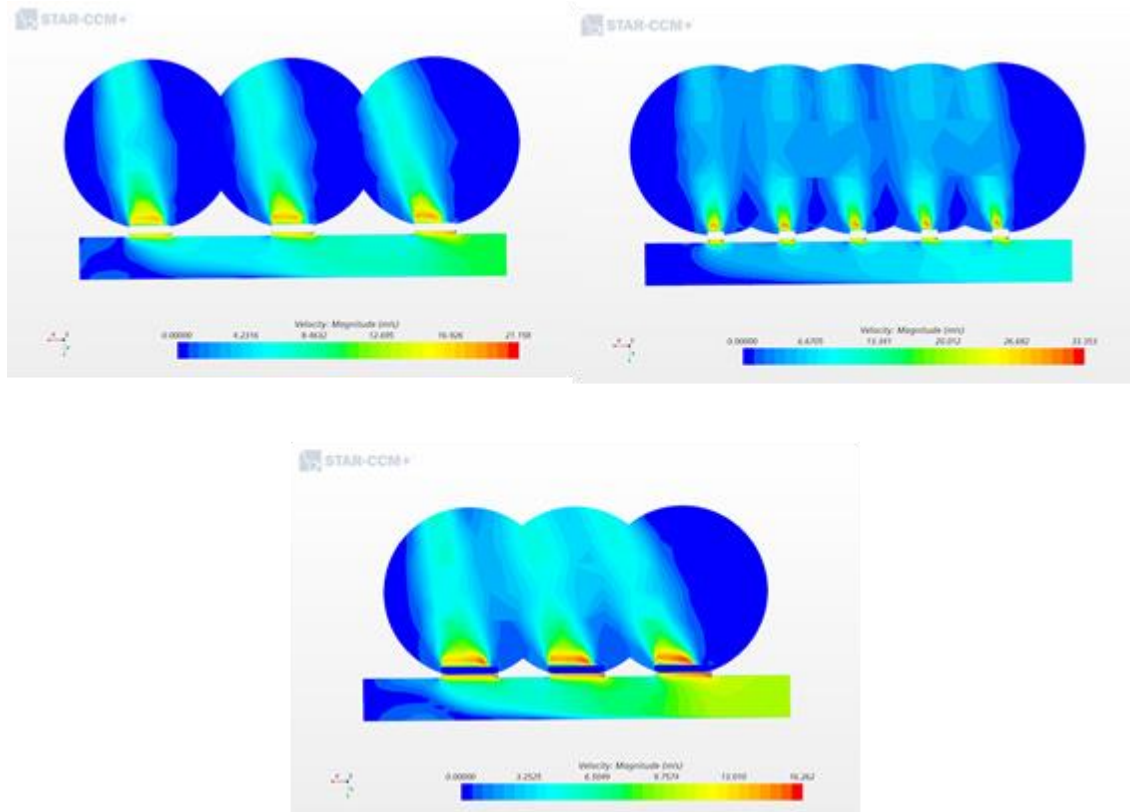


Ilustración 72: Sección transversal de una rejilla (velocidades)



## 10.2. Comparativas (diferentes longitudes de rejilla)

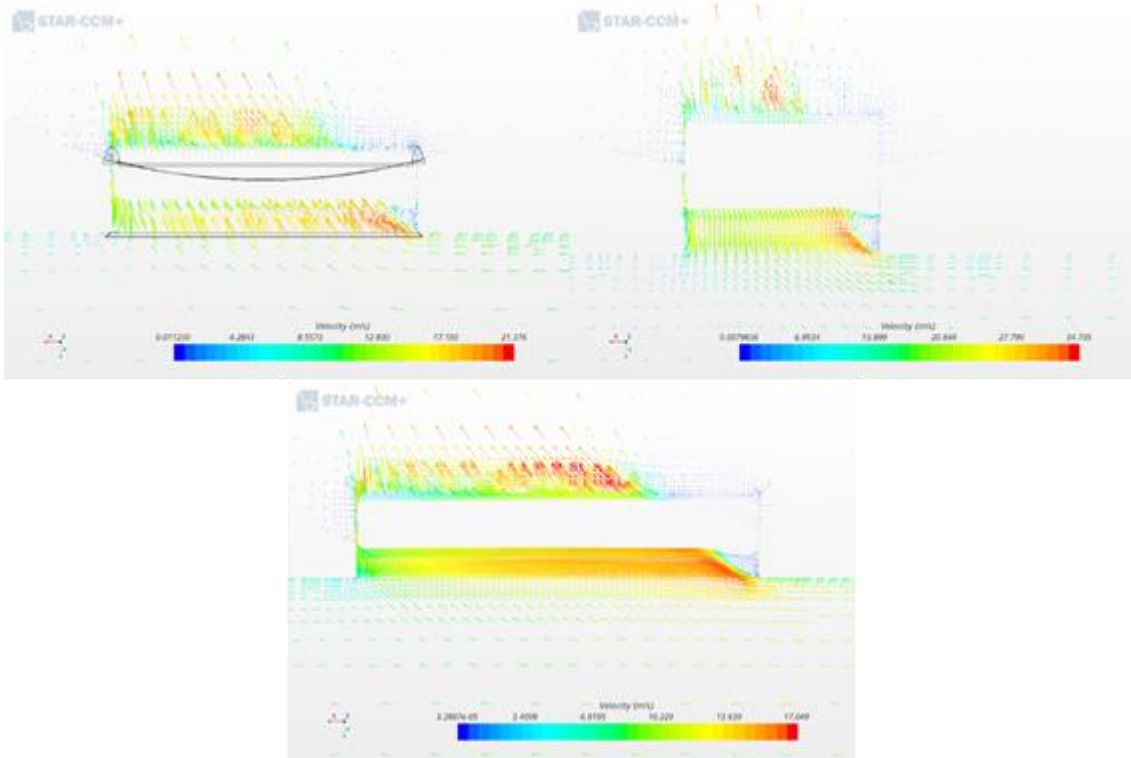


*Ilustración 73: Campos de velocidades con lama horizontal.*

*(longitudes de rejillas de 600 mm, 200 mm y 800 mm de izquierda a derecha y de arriba a abajo)*

Como puede observarse a mayor longitud de rejilla menores velocidades de salida. Se puede explicar esta tendencia mediante la ecuación de la continuidad, según la cual la velocidad de un flujo aumenta al reducirse la sección de paso, pues el caudal de entrada debe ser igual al de salida.

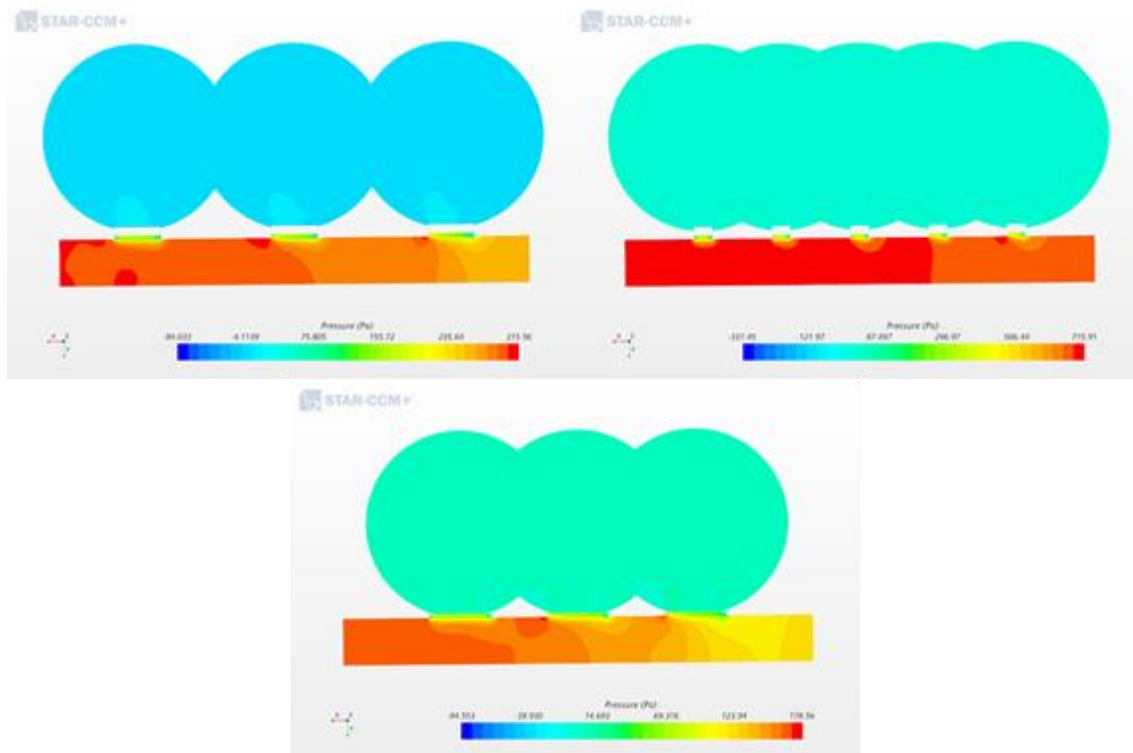
Otra observación digna de mención es la variación en el ángulo de salida del aire. Respecto a esta dirección, la solución de mayor idoneidad sería reducir la longitud de la rejilla, consiguiendo una mayor perpendicularidad con respecto a la normal de dicho elemento. Una abertura de mayores dimensiones provoca que el caudal temprano de aire ejerza una mayor fuerza sobre la trayectoria de salida. Por ello estas rejillas requerirían de algún sistema o elemento que direcciona el flujo en caso de querer obtener una salida ortogonal del aire por todas las rejillas del sistema de ventilación.



*Ilustración 74: Vectores de velocidad en la rejilla 1 con lama horizontal.*

*(longitudes de rejilla de 600 mm, 200 mm y 800 mm de izquierda a derecha y de arriba a abajo)*

Para ayudar a apreciar estas tendencias se han representado los vectores de velocidad ampliando la zona correspondiente a la primera rejilla. La ausencia de vectores en el hueco blanco responde a la colocación de la lama, ya que el plano en el que se representan estos valores es el plano central, que en este caso corta a la lama dada su posición.



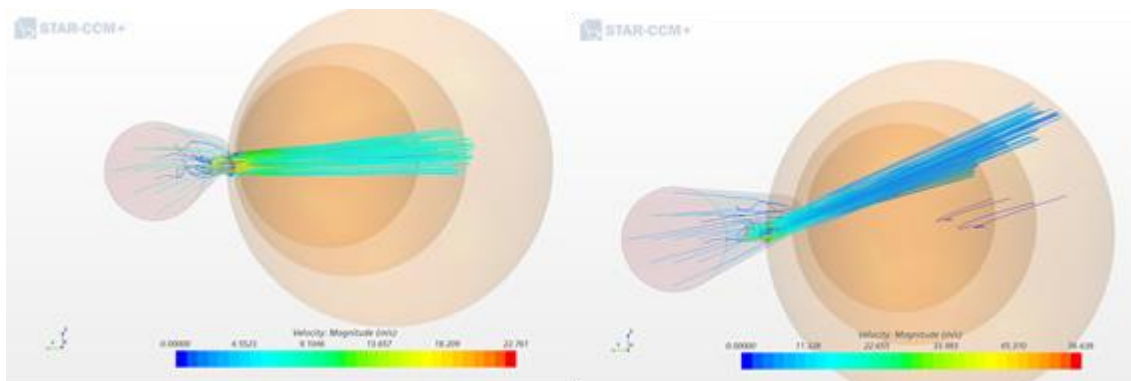
*Ilustración 75: Campos de presiones con lama horizontal.*

*(longitudes de rejilla de 600 mm, 200 mm y 800 mm de izquierda a derecha y de arriba a abajo)*

En cuanto al campo de presiones se visualiza una presión superior en mayor longitud de la tubería cuando las rejillas son más pequeñas. Concuerda con el hecho de que el caudal saliente con rejillas de mayor tamaño genere una sobrepresión menor al final de esta. O, dicho de otra manera, la sobrepresión al final de la tubería se propaga a una mayor longitud aguas arriba.

Las zonas de las rejillas indican una bajada de presión que se corresponde con las altas velocidades del aire saliente, además de con una comunicación con el aire del exterior.

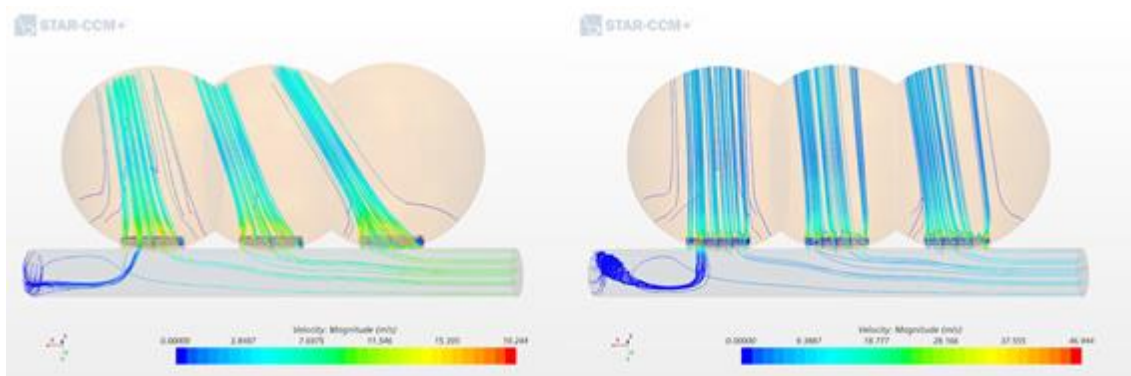
A continuación, se comparan los resultados extraídos con la lama a diferentes posiciones. Para un mayor grado de cierre el flujo se bifurca evitando el obstáculo que supone la lama. Esta reducción de la sección provoca a su vez un aumento en la velocidad. La trayectoria que sigue el flujo puede visualizarse mediante las líneas de flujo, las cuales indican que el aire tiende a salir con un ángulo respecto a la horizontal, causa de la cual es la rotación de la lama intermedia.



*Ilustración 76: Vista lateral de la dirección de salida del flujo de aire.*

*(lama horizontal y lama a 45° de izquierda a derecha)*

Es remarcable la obtención de un ángulo de salida más cercano al deseado, en este caso con mayor perpendicularidad al eje de la tubería, consiguiendo de este modo uniformizar los flujos de salida a través de las rejillas.



*Ilustración 77: Vista en planta de la dirección de salida del flujo de aire.*

*(lama horizontal y lama a 45° de izquierda a derecha)*

Este cambio posiblemente sea consecuencia del aumento de presión que se da dentro de la tubería con respecto al caso de la lama horizontal. La presión empuja al flujo hacia la salida ayudando en su direccionamiento.

Visto desde otro ángulo, se puede visualizar la diferencia en la dirección vertical del aire al disponer la lama de forma casi horizontal y a 45° aproximados. La distribución del flujo con la lama a 45° provoca torbellinos tras la lama, a la vez que acelera la fracción del flujo que surca la sección libre. Sin embargo, la dirección vertical, como previamente se ha manifestado, se altera y resulta en una salida dispar a la horizontal. Otro detalle a mencionar es la percepción de la

llamada vena contracta, que es el área de la sección transversal con menor diámetro, donde la velocidad es horizontal. Este efecto se debe a los ángulos agudos presentes en el cambio de sección (pertenecientes al área de contacto entre la rejilla y la tubería).

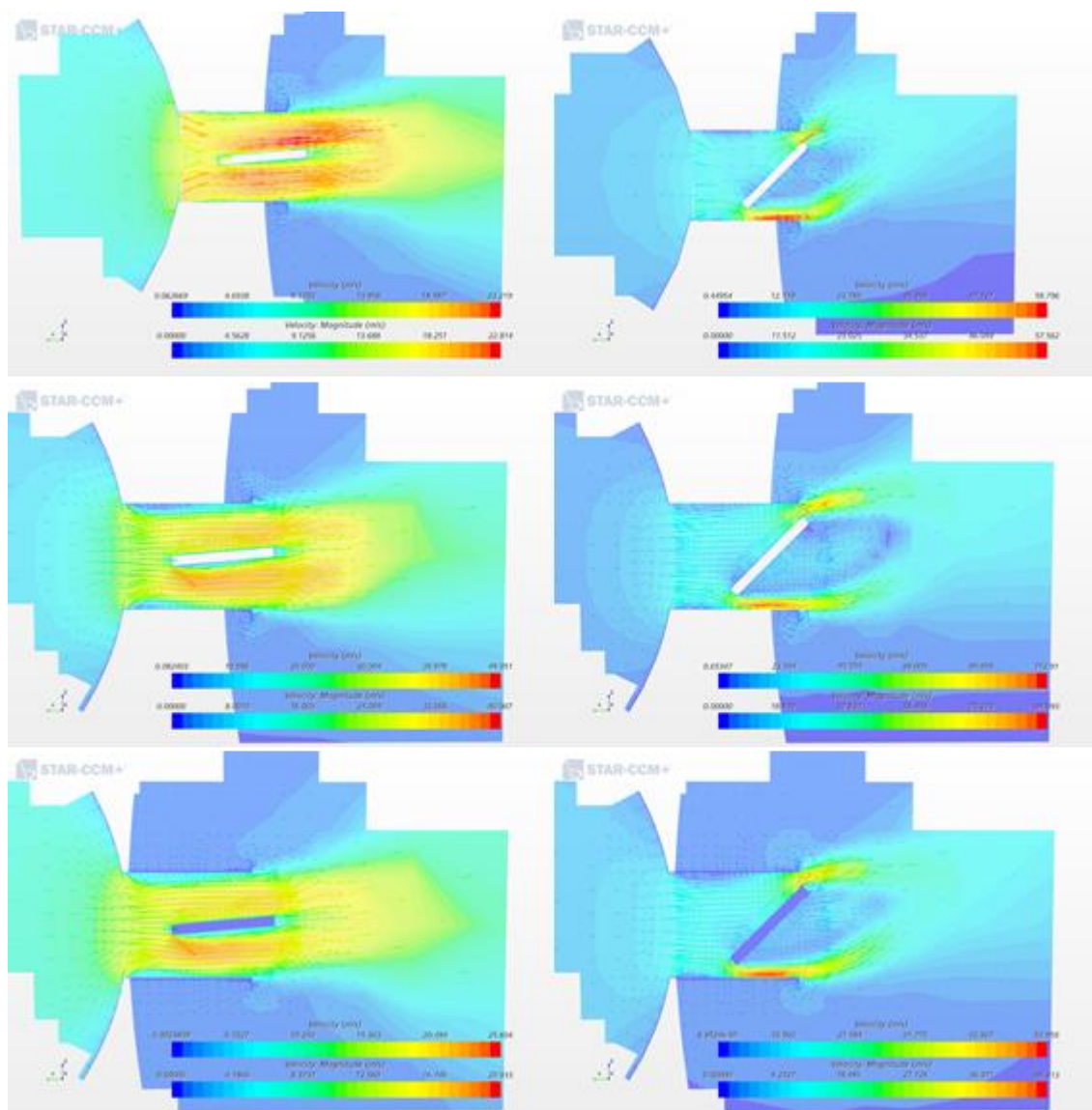
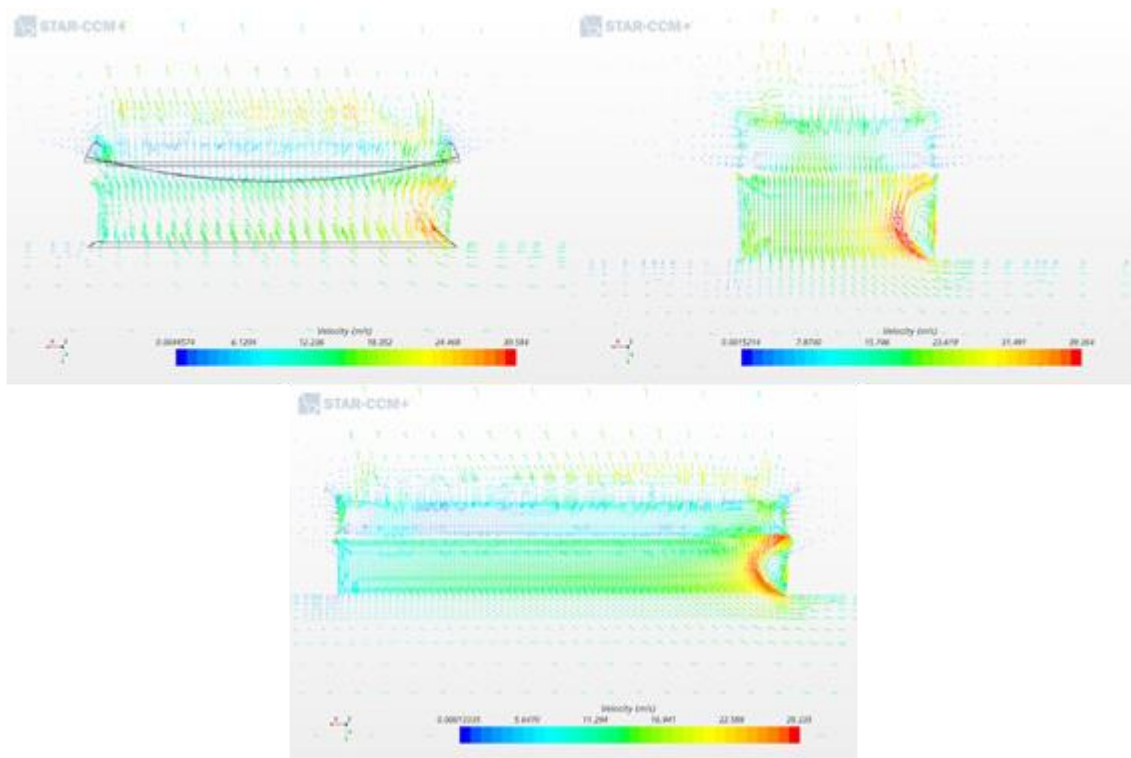


Ilustración 78: Distribución de velocidad en la sección de una rejilla con lama a diferentes posiciones.

(longitudes de rejilla 600 mm, 200 mm y 800 mm de arriba a abajo)



Al representar los vectores de velocidad en el plano central se observa un torbellino en la parte inicial de la rejilla, un efecto que se repite en todas las simulaciones con la lama a  $45^\circ$ . Esto se estudiará más adelante con planos adicionales para entender su comportamiento.

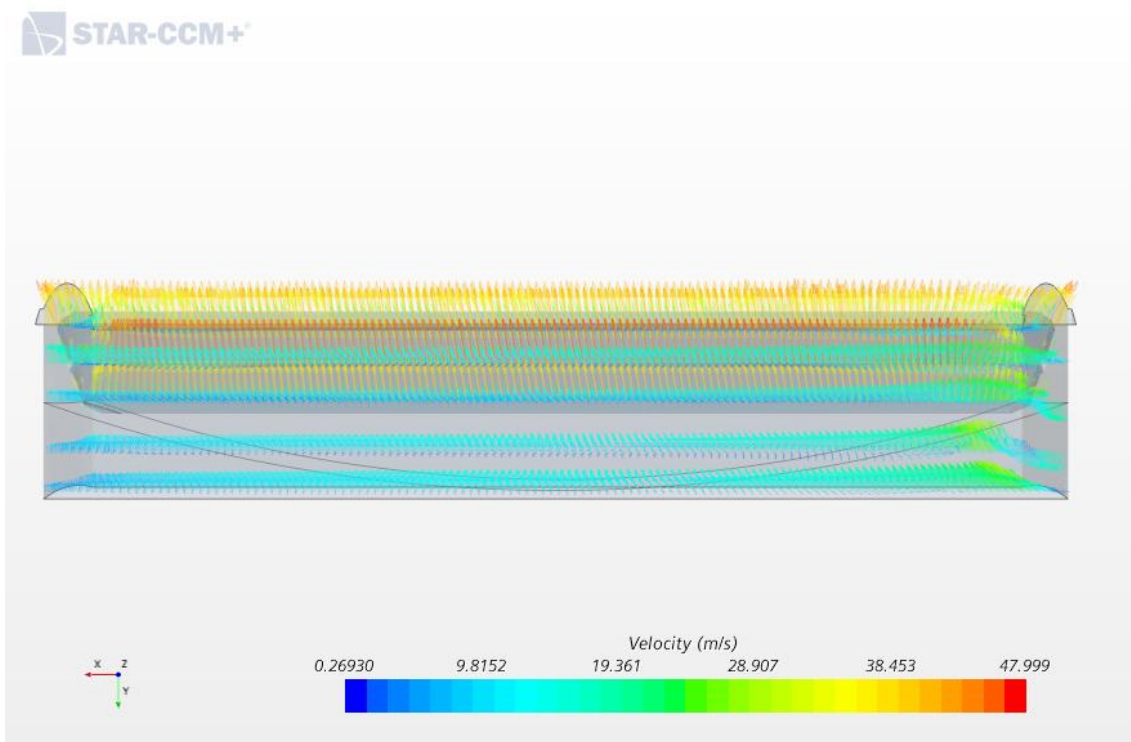


*Ilustración 79: Vectores de velocidad en la rejilla 1 con lama a  $45^\circ$ .*

*(longitudes de rejilla de 600 mm, 200 mm y 800 mm de izquierda a derecha y de arriba a abajo)*

### 10.2.1. Torbellino en las simulaciones a 45°

Con ayuda de las posteriores ilustraciones (ilustraciones 80, 81, 82, 83, 84 y 85) se explica el fenómeno de torbellino presente en las rejillas con lama a 45° en todos los casos. A mayor velocidad axial, mayor es el efecto, con lo que se produce con mayor brusquedad en los orificios iniciales. Mediante 5 planos verticales que cortan la rejilla número 1 se puede intuir la trayectoria del aire gracias a los vectores de velocidad.



*Ilustración 80: Planos auxiliares en la rejilla 1 con sus respectivos vectores de velocidad*

En los primeros planos, se observa un ángulo pronunciado en los vectores del lado derecho, pues el aire circula de derecha a izquierda. Es por eso que estos tienen mayor velocidad a su vez. Según avanza el flujo se divide en dos: el circulante por la parte superior de la lama, y el circulante por la parte inferior de la lama. En este choque la fracción de aire que toma la trayectoria inferior no produce grandes turbulencias. Simplemente aumenta su velocidad, dada la reducción de sección de paso. No obstante, el aire que toma el camino superior, que contiene un gran componente axial y gran velocidad, choca contra la lama que al estar situada en un ángulo no encuentra una salida de forma rápida y tiende a tomar una trayectoria hacia la derecha (contra la pared). Esto provoca

un torbellino a gran velocidad en la parte de la derecha de la rejilla. A su vez, el aire sale con mayor distribución a lo largo de la sección de la rejilla, aunque este torbellino podría provocar consecuencias sonoras y mecánicas no deseables.

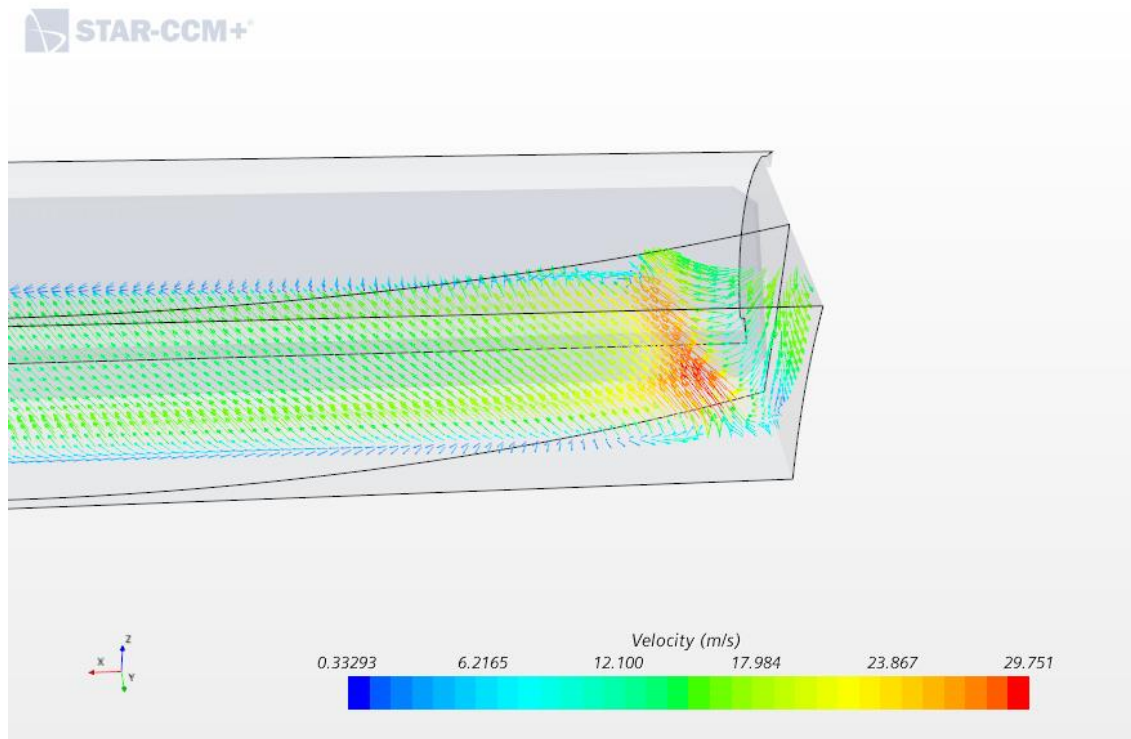


Ilustración 81: Vectores de velocidad en la rejilla 1 (detalle del plano 2)



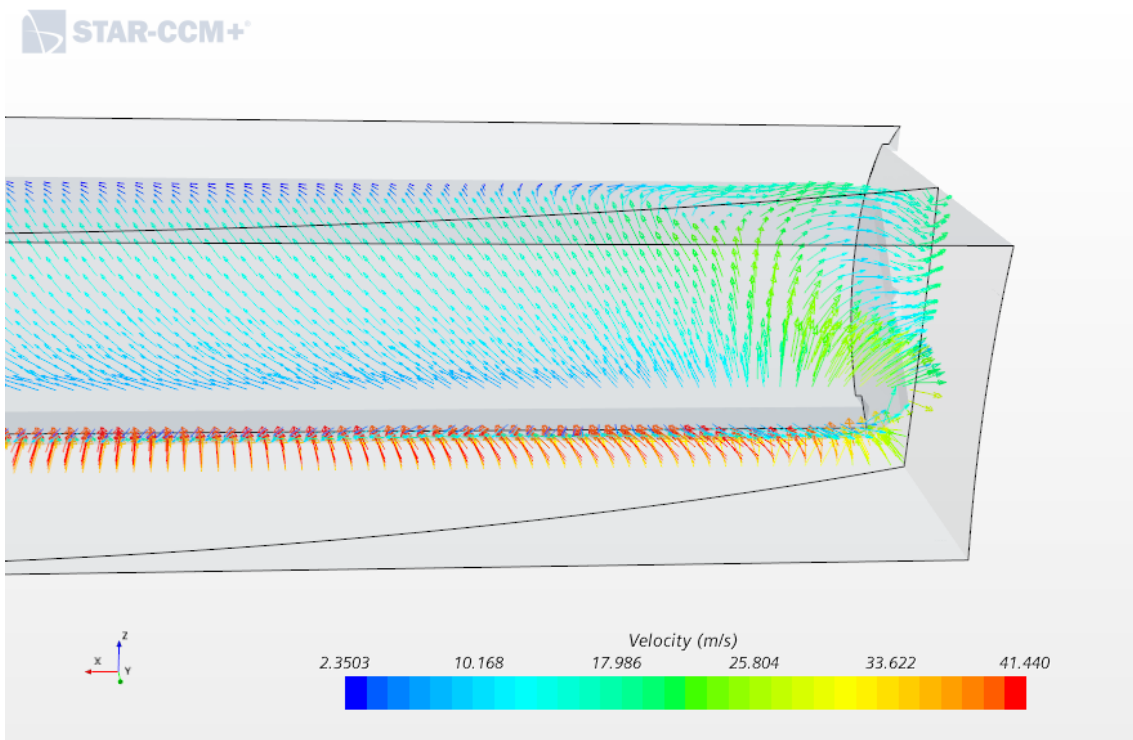


Ilustración 82: Vectores de velocidad en la rejilla 1 (detalle del plano 3)

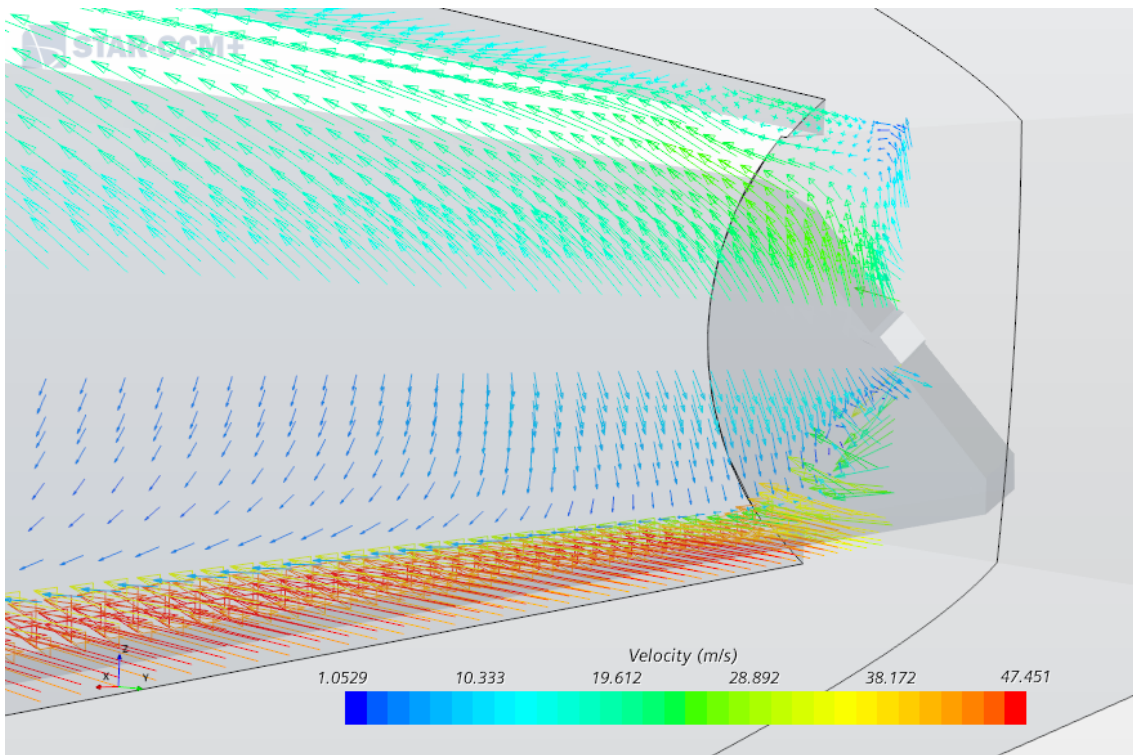


Ilustración 83: Vectores de velocidad en la rejilla 1 (detalle del plano 4)

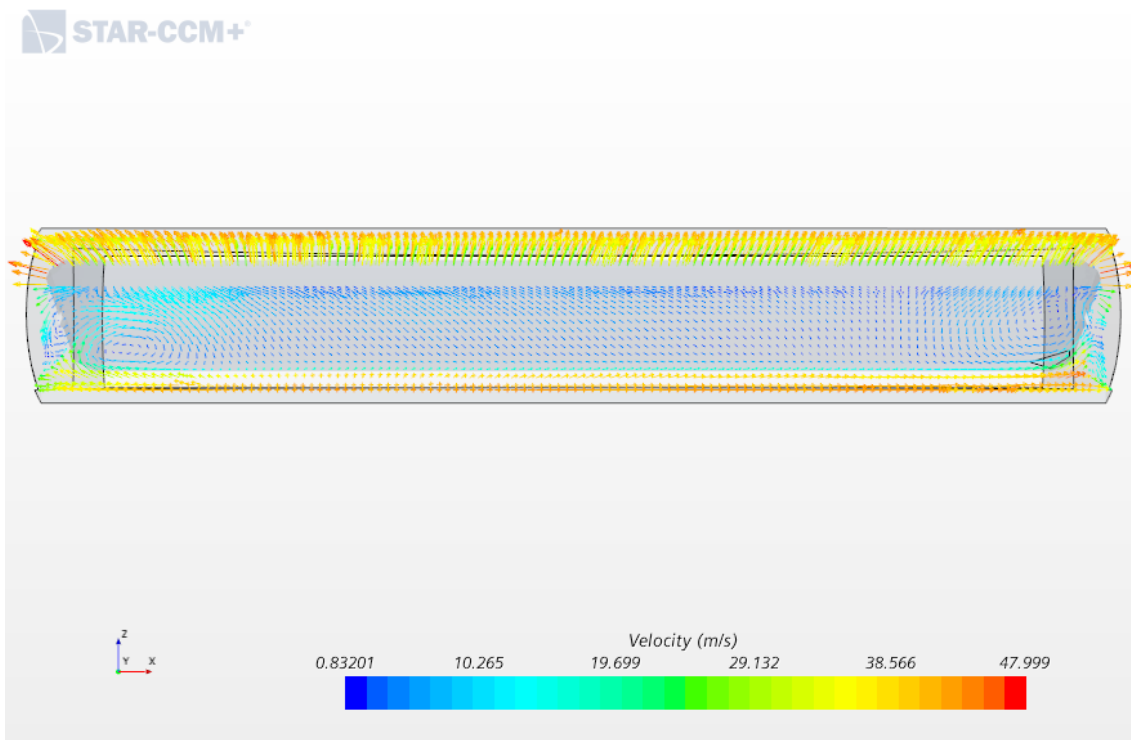


Ilustración 84: Vectores de velocidad de la rejilla 1 (vista frontal del plano 5)

El contraste de gran velocidad a la salida inferior con la velocidad baja del aire al otro lado de la rejilla produce un torbellino a baja velocidad. En el siguiente detalle (Ilustración 85) puede verse cómo la geometría de la lama (corte angular en vez de ser un paralelepípedo) genera una corriente de mayor velocidad ligeramente ascendente. Rápidamente vuelve a la dirección del resto del flujo que pasa por debajo de la lama, sin grandes efectos en el flujo en general.

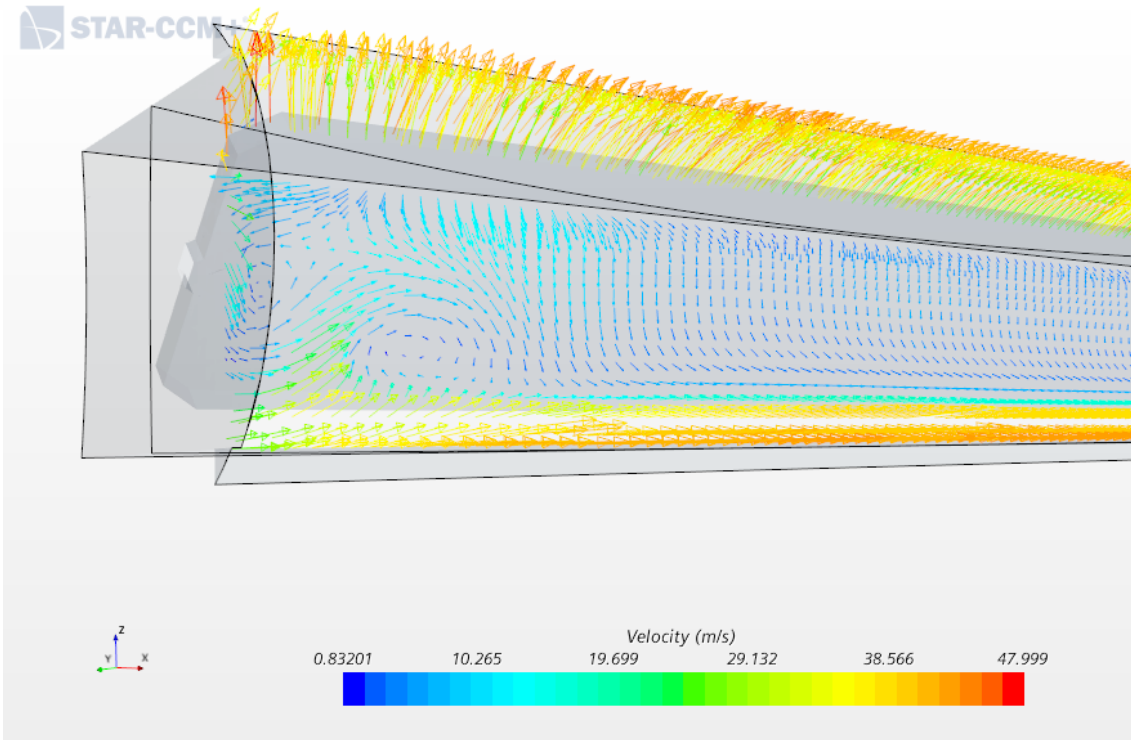


Ilustración 85: Vectores de velocidad de la rejilla 1 (detalle del plano 5)

### 10.3. Tubería con extremo opuesto abierto

Posteriormente se presentan los resultados obtenidos y comparativas entre las rejillas estudiadas aplicando la apertura del extremo del conducto. El plano seleccionado para mostrar la mayoría de los resultados es un plano central que corta a todos los elementos por la mitad para mostrar las tendencias generales. Adicionalmente, con la ayuda del escalar de velocidades y de presiones se muestra mejor la trayectoria del flujo para constatar su comportamiento a través de las aberturas, así como del mismo ducto.

#### 10.3.1. Rejilla de 200 mm

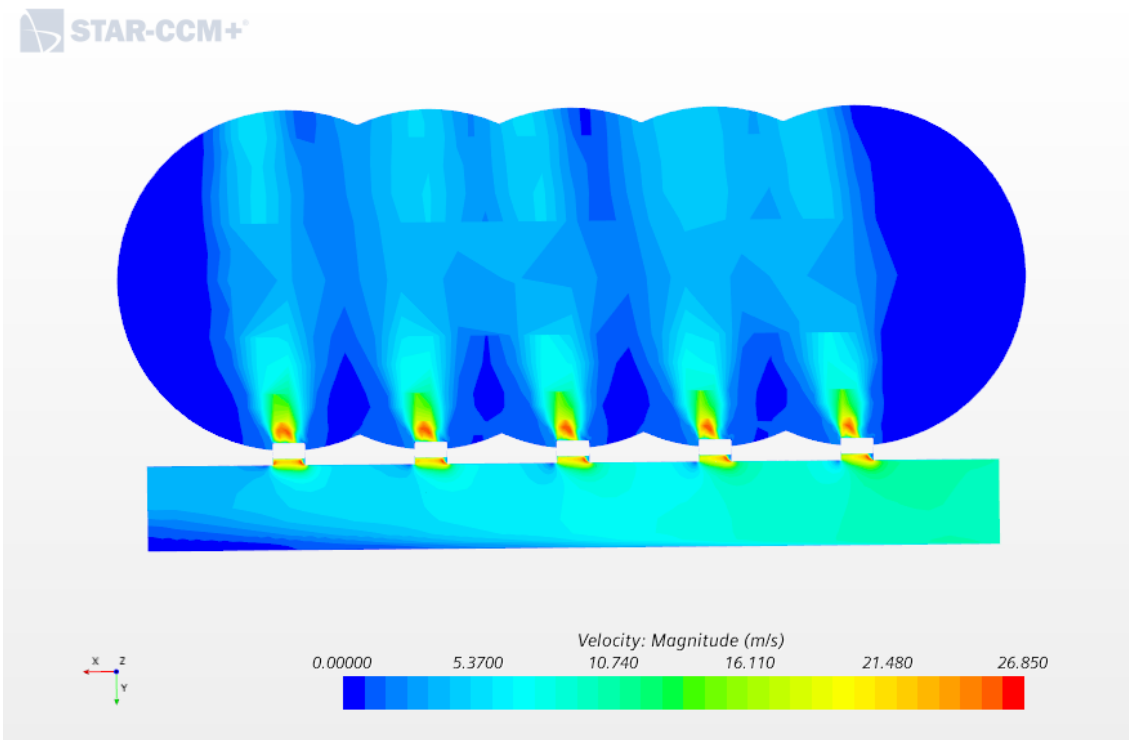
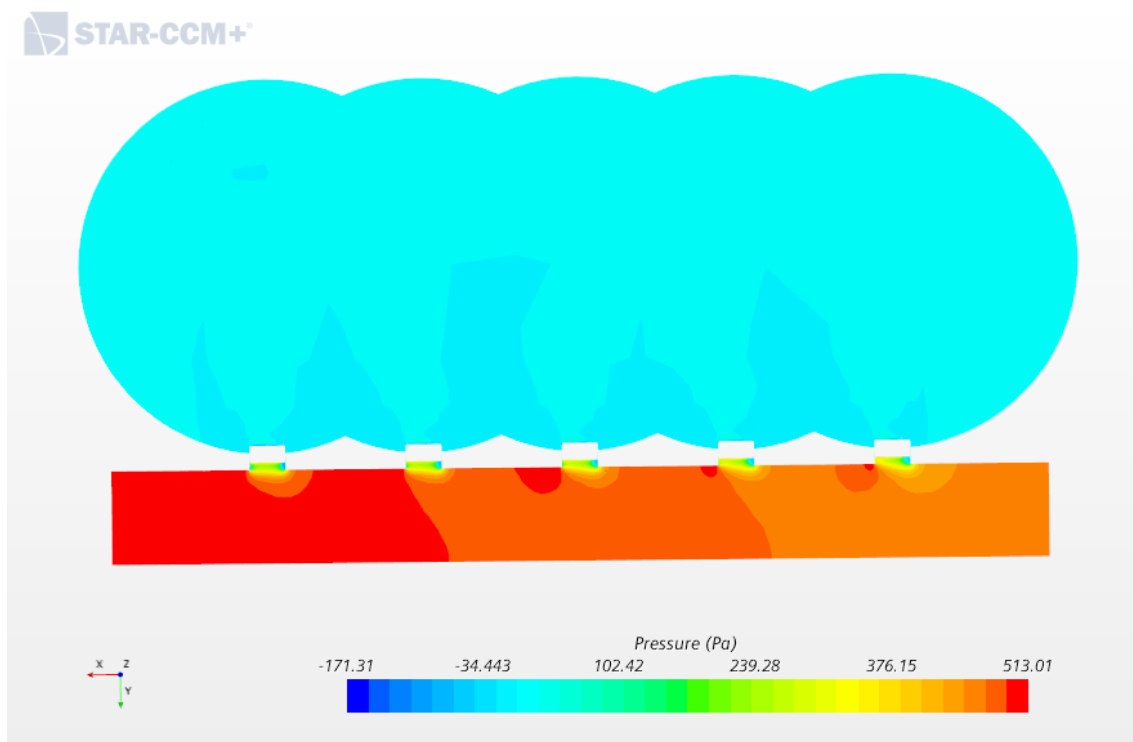


Ilustración 86: Campo de velocidades con la tubería abierta (rejilla de 200 mm)

Como podemos visualizar en la Ilustración 86, al imponer una presión de salida al final de la tubería el aire continúa su trayecto abandonando la región de simulación también por este camino. No obstante, la dirección de salida del aire se mantiene bastante homogénea y perpendicular, tal y como se estimó en la simulación con el extremo opuesto cerrado.

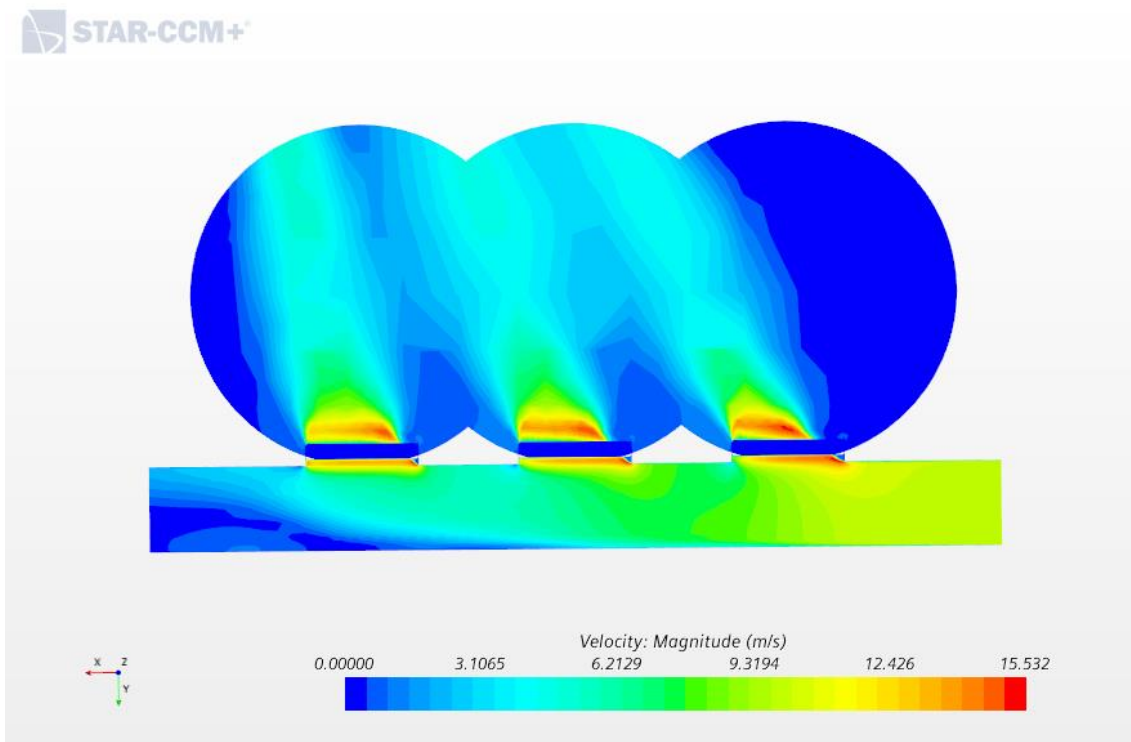
Otra apreciación a comentar es la tendencia que tiene el aire al salir por la tubería. Esto es, los diversos orificios que conectan la alta presión en la tubería con la baja presión de la estancia provocan un efecto de atracción del flujo en este sentido. Es por ello que el flujo a la salida tiene una velocidad mayor en la mitad de la sección donde se sitúan las rejillas. De esta manera se demuestra que, si se aumentara en exceso la presión en el interior de la tubería el aire se detendría (al verse reducida su velocidad) o, por el contrario, retrocedería hacia las rejillas situadas inmediatamente antes. Esto se puede evitar realizando estrechamientos en el ducto de forma periódica buscando aumentar la velocidad para poder procurar un caudal en cualquier rejilla.



*Ilustración 87: Campo de presiones con la tubería abierta (rejilla de 200 mm)*

En cuanto a las presiones, podemos observar cómo los valores se ven reducidos con respecto al caso de la tubería cerrada. Los resultados obtenidos pueden considerarse lógicos ya que la presión iría en aumento dentro de la tubería, al verse reducida su velocidad y mantener una sección constante. Es decir, la energía cinética que posee el aire se transforma en energía de presión a lo largo de la misma.

### 10.3.2. Rejilla de 800 mm



*Ilustración 88. Campo de velocidades con la tubería abierta (rejilla de 800 mm)*

Para el caso de una longitud mayor, como era de esperar, los efectos previamente mencionados son más fácilmente identificables. Los ángulos de salida en las rejillas son aún más pronunciados, pues el efecto del flujo temprano es más evidente al no disponer de una sobrepresión final que lo compense con el componente radial.

Además de ello, se observa claramente ese efecto de succión o atracción comentado con la rejilla de menor tamaño. Se ve con mayor facilidad debido al aumento de caudal de salida por las rejillas.

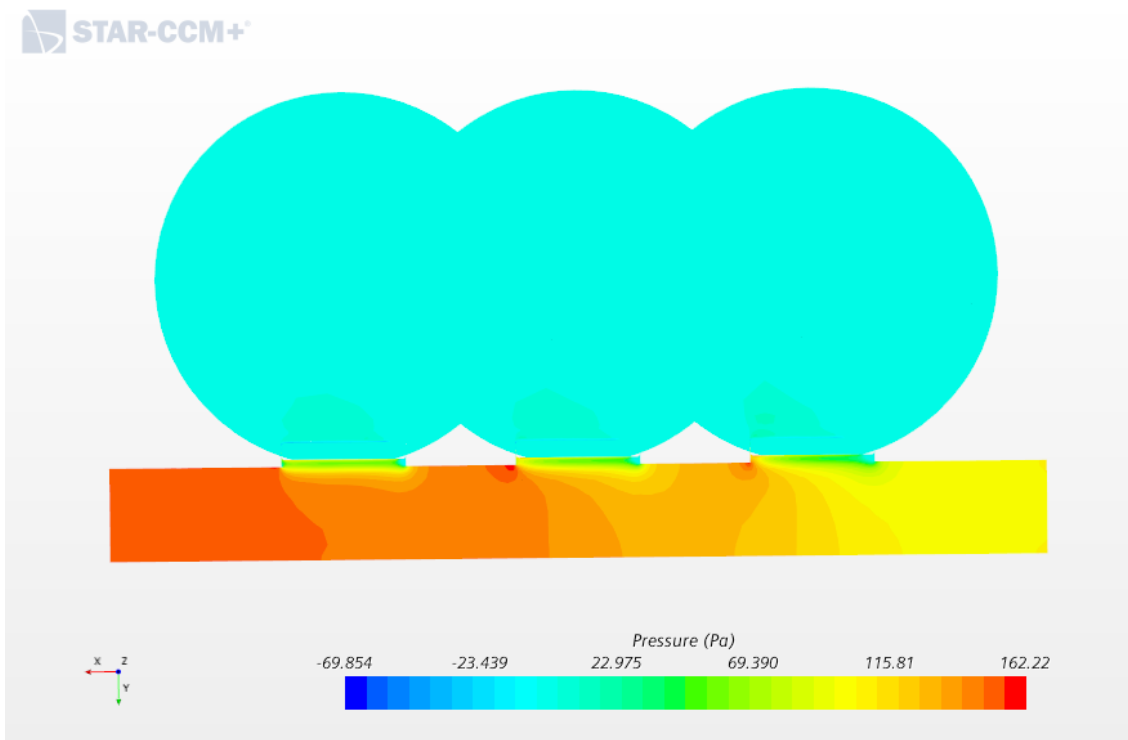


Ilustración 89: Campo de presiones con la tubería abierta (rejilla de 800 mm)

Se observa un comportamiento similar al previamente descrito también en las presiones.

De este modo se concluye que la apertura del extremo opuesto de la tubería no genera cambios significativos en la dirección de salida del aire, simplemente se acentúa el desvío generado. Esto representaría la tendencia que podría seguir el fluido en un tramo de tubería inmediatamente anterior, analizando las rejillas al comienzo de dicho conducto. Se observa, además, una atracción del flujo hacia la mitad de la tubería donde se encuentran las aberturas laterales, indicando de esta manera que en caso de diseñar un sistema largo sería recomendable reducir su sección periódicamente para aumentar su velocidad.



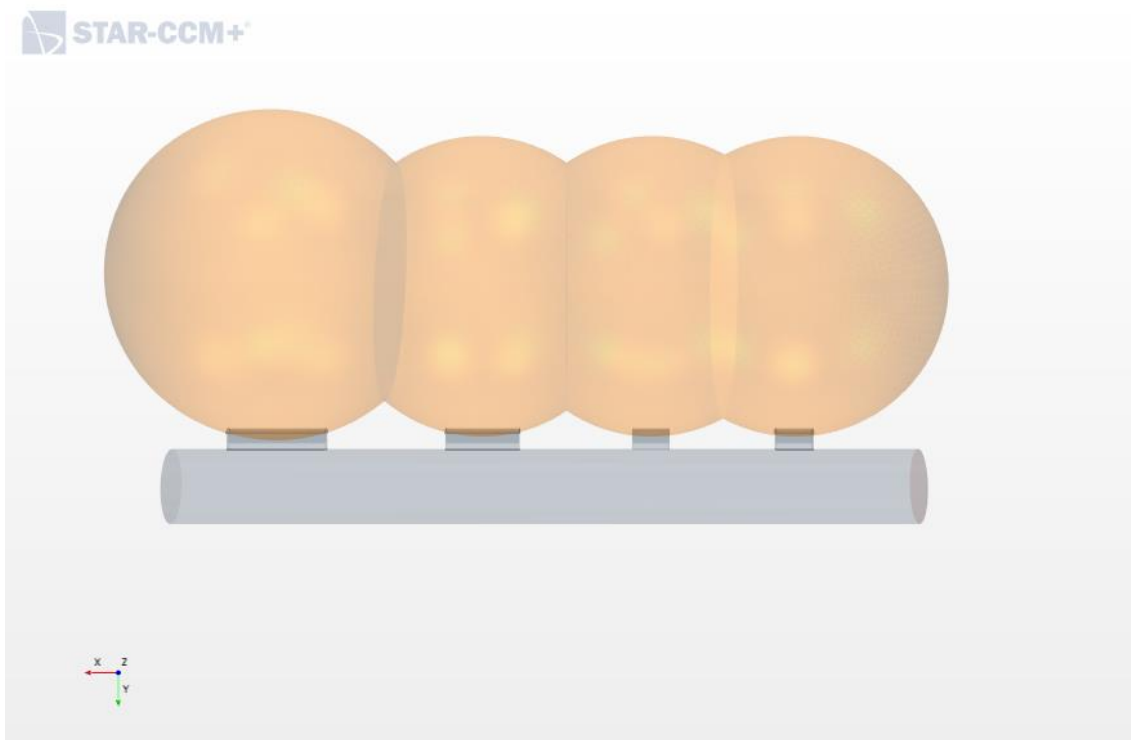
## 10.4. Diseño con rejillas de longitud variable

### 10.4.1. Simulación inicial

Con la intención de aplicar las conclusiones parciales alcanzadas mediante los análisis realizados en los apartados anteriores por los diferentes diseños de rejillas, se decide realizar un diseño combinando estas.

En primer lugar, se colocan las rejillas de menor tamaño al comienzo de la tubería, pues disponen de una gran direccionalidad aún en este emplazamiento. Gradualmente, se aumenta el tamaño de la rejilla, que gracias al flujo de salida por las rejillas anteriores mejorará su ortogonalidad por la reducción del efecto del flujo temprano.

Dicho esto, se propone el siguiente esquema, el cual contiene dos rejillas de 200 mm, una de 600 mm y una rejilla final de 800 mm.



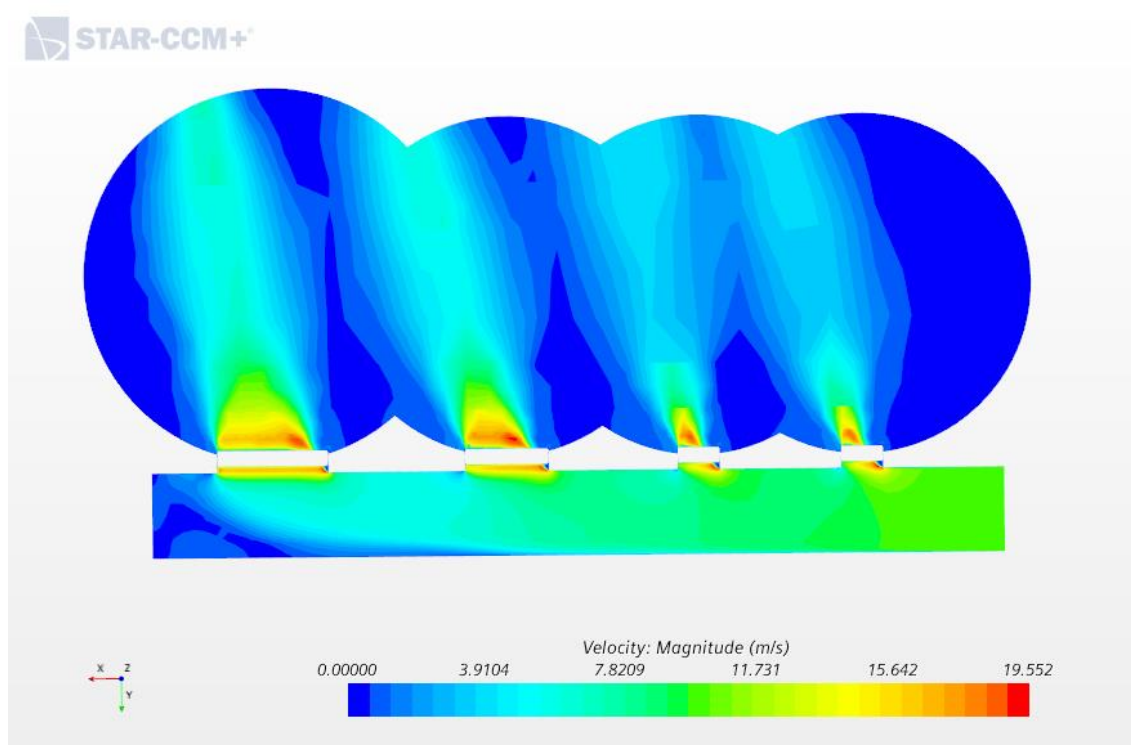
*Ilustración 90: Geometría y distribución de las rejillas en el diseño con longitudes variables*

Cabe mencionar que se decide comenzar las simulaciones de este apartado con el extremo opuesto de la tubería cerrado por temas de simplificación a la hora de tratar con el software. Adicionalmente, estas simulaciones son necesarias en



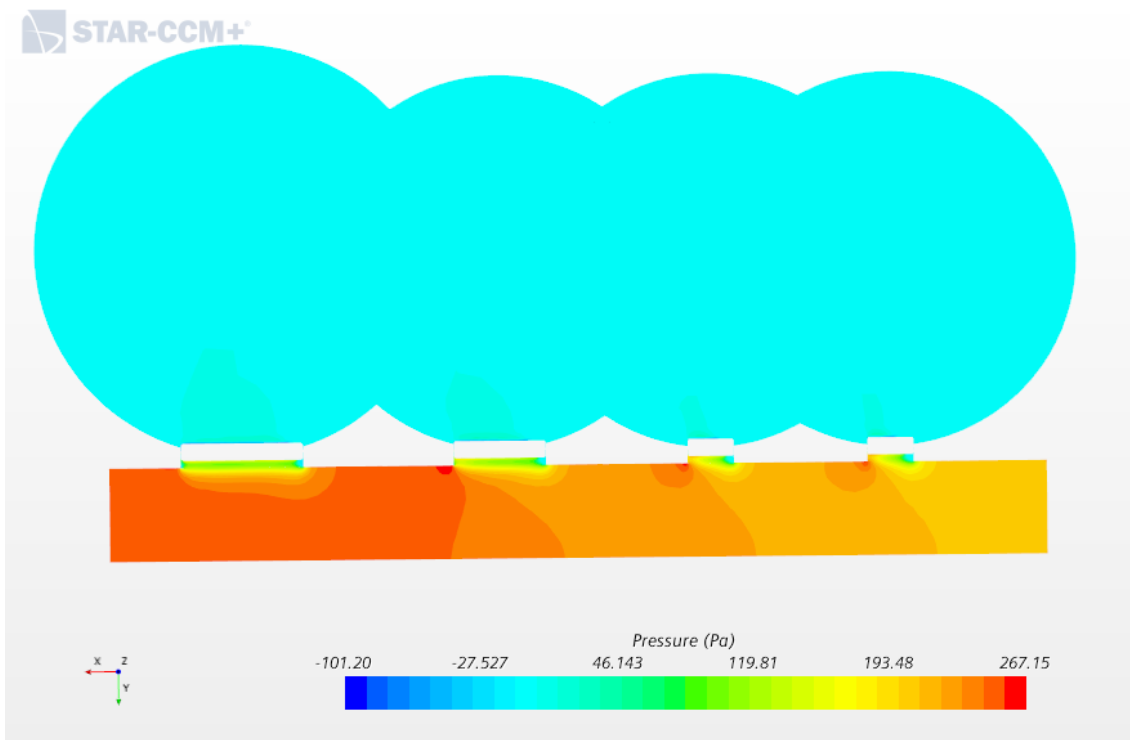
caso de querer imponer una presión en dicho extremo, al no disponer de datos de esta índole. De esta manera, los resultados servirían de referencia para posteriores estudios.

Las condiciones de contorno impuestas son las mismas que en el resto de casos: el aire se introduce en la tubería de derecha a izquierda a 10 m/s y sale por las esferas o aire de la estancia. Con estas condiciones se consiguen los siguientes resultados:



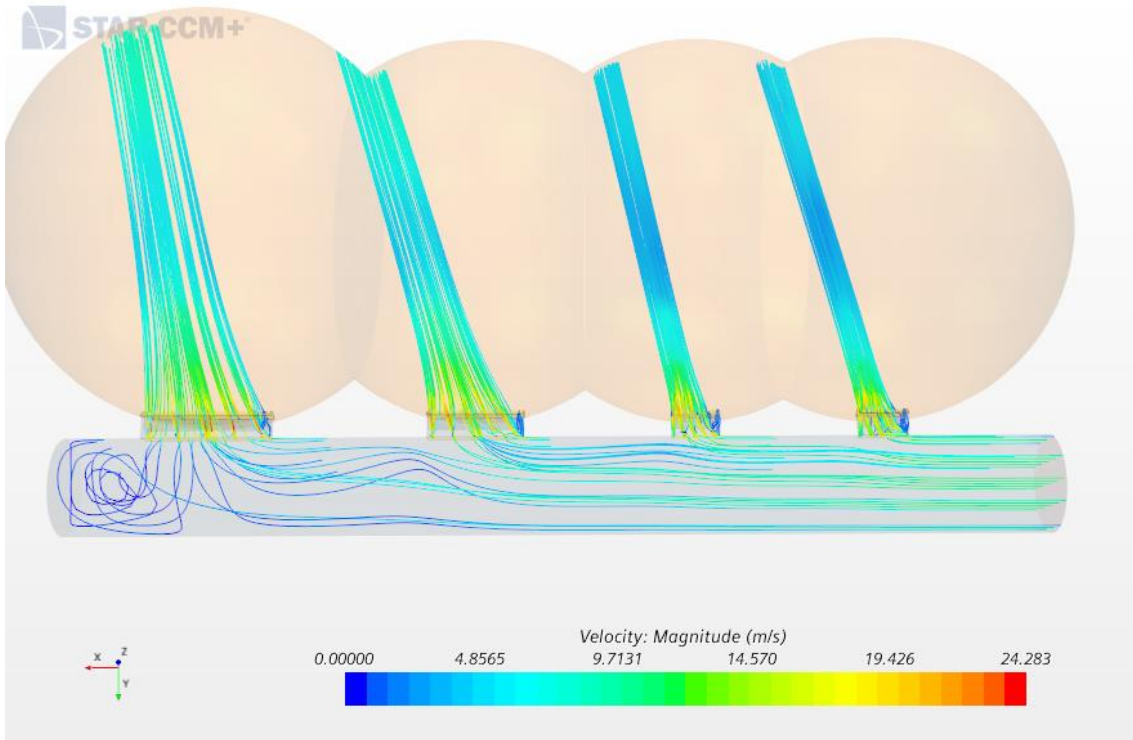
*Ilustración 91: Campo de velocidades en el diseño con longitudes variables*

Las velocidades a través de las rejillas son equilibradas, además de verse disminuido el desvío a la salida. El ángulo, sin embargo, no es perpendicular y contiene un componente axial que influye con fuerza también en las primeras rejillas.



*Ilustración 92: Campo de presiones en el diseño con longitudes variables*

Asimismo, la distribución de presiones es más homogénea que en el caso de las rejillas de longitud menor. Esto podría suponer un menor gasto por impulsión al no tener que sobreponerse a un gradiente de presiones tan adverso.



*Ilustración 93: Líneas de corriente en el diseño con longitudes variables*

Mediante las líneas de corriente o streamlines se advierte ese desvío en el ángulo de salida del aire, que se hace evidente en todas las rejillas, pudiéndose apreciar también en las últimas rejillas.

## 10.4.2. Adición de ramales

Para contrarrestar este efecto de desvío se opta por añadir pequeños tramos de tubería que cumplirían la función de ramal o conexión entre tubería y rejilla. Se busca que esta sección absorba parte del efecto del flujo temprano y redirija el aire en la dirección deseada.

En primera instancia se propone una conexión angular sin redondeos. El resultado sería el especificado en la siguiente ilustración (Ilustración 94), en el que las rejillas se separan una pequeña distancia más de la tubería para dejar espacio a dicha conexión.

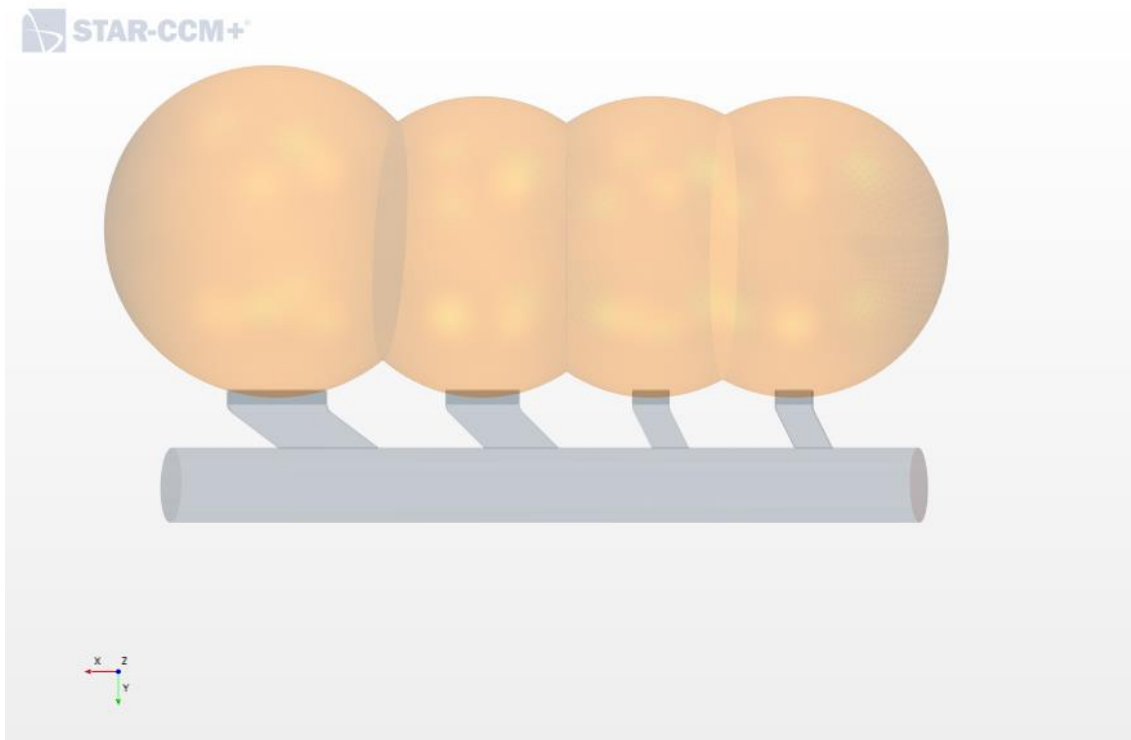
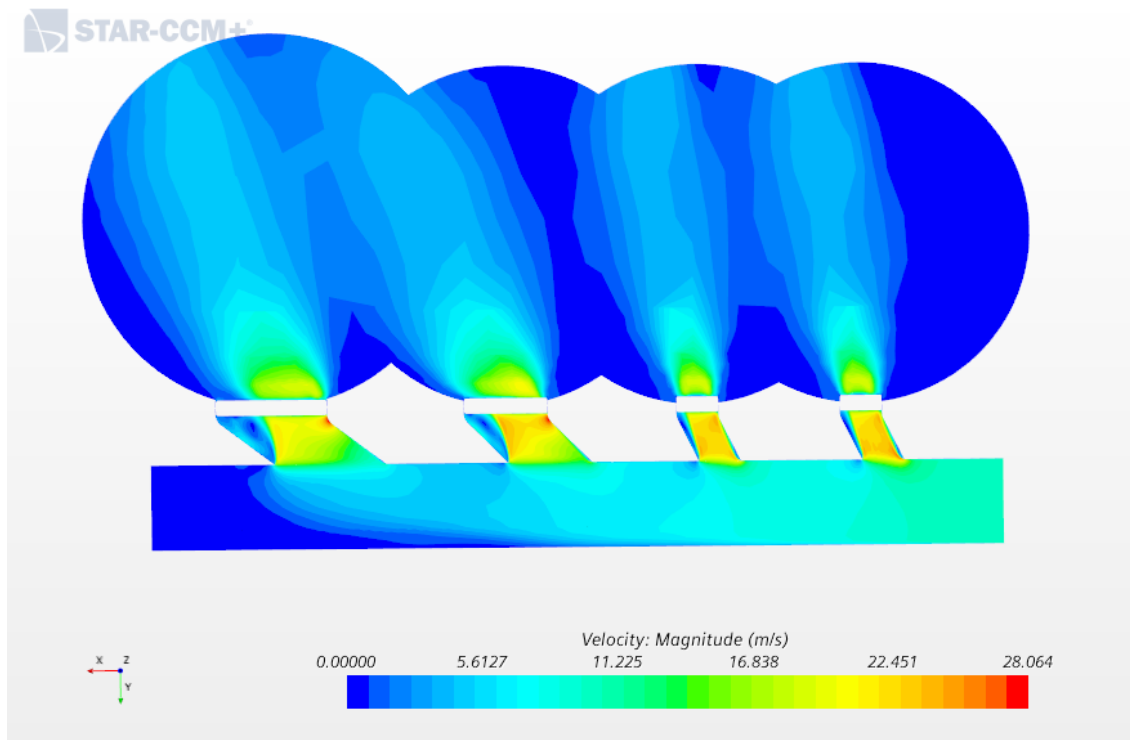


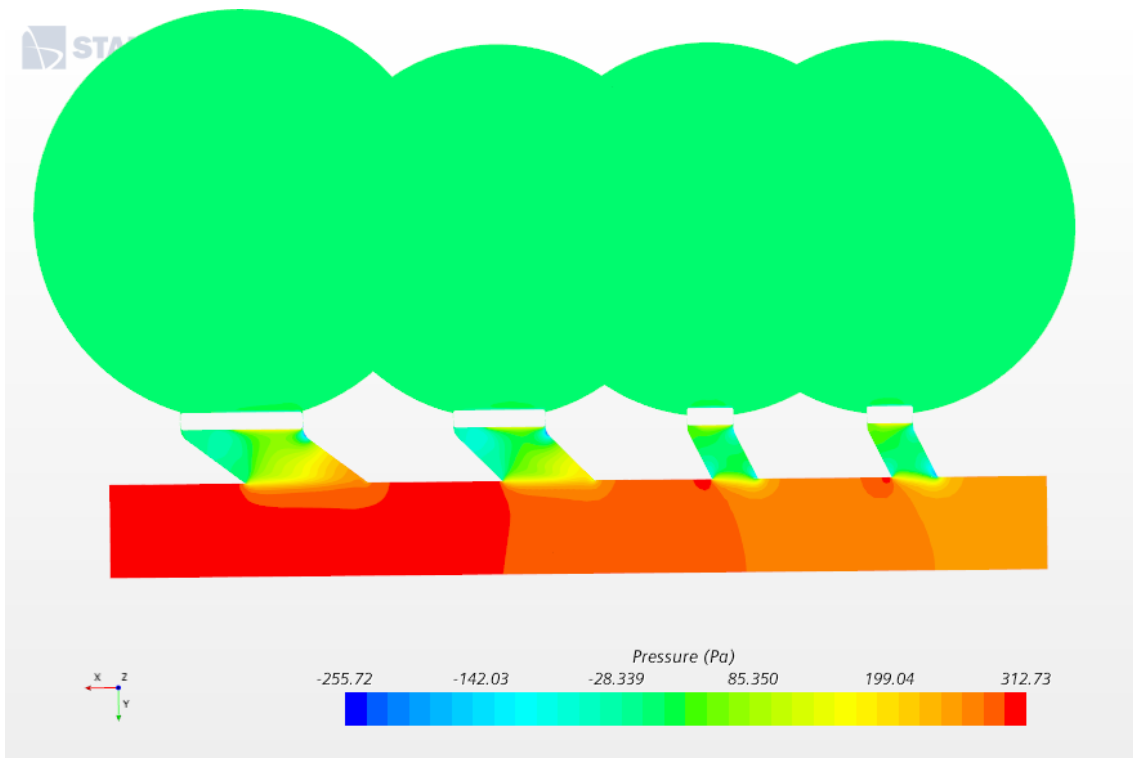
Ilustración 94: Geometría y distribución de las rejillas en el diseño con ramales angulares

De este modo se consiguen los siguientes resultados en los diferentes parámetros.



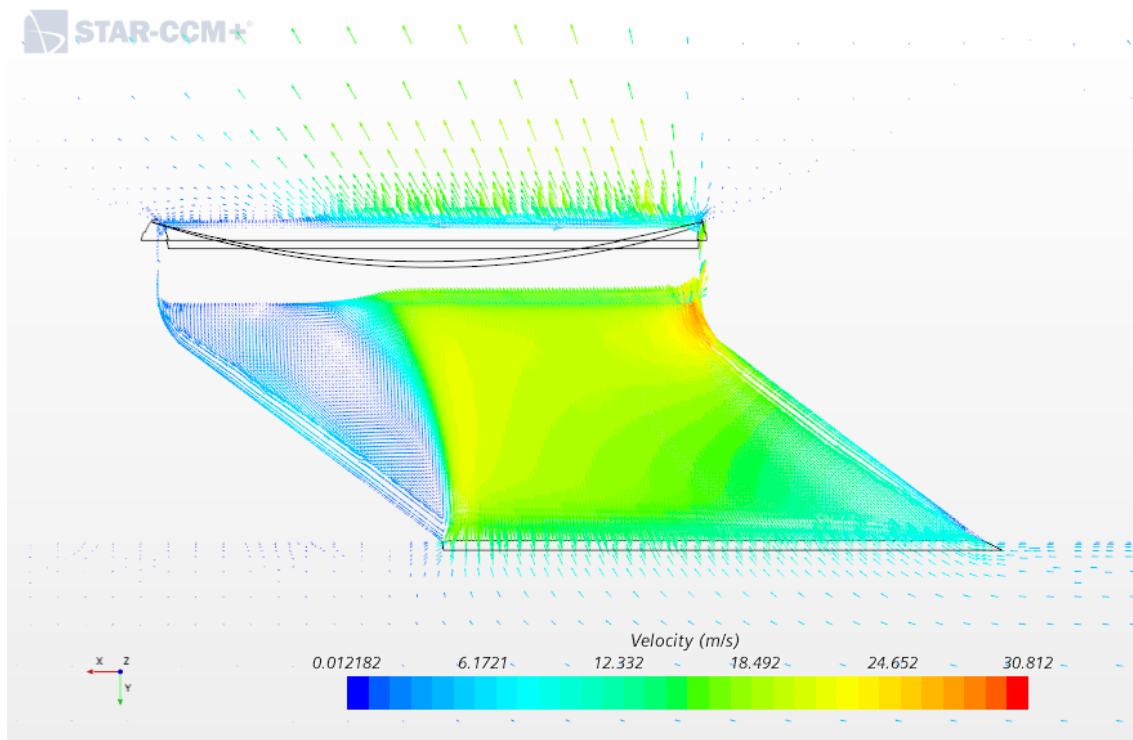
*Ilustración 95: Campo de velocidades en el diseño con ramales angulares*

A simple vista podemos determinar que este sistema no sería eficaz a la hora de redireccionar el flujo. Además de no conseguir corregir el ángulo de salida, la geometría de las conexiones provoca zonas con muy baja velocidad en el interior de las mismas, lo que provoca un desaprovechamiento del área de las rejillas.



*Ilustración 96: Campo de presiones en el diseño con ramales angulares*

Los tramos de conexión, a su vez, consiguen una transición gradual de la presión, obteniendo un resultado más homogéneo al llegar a los elementos de salida.

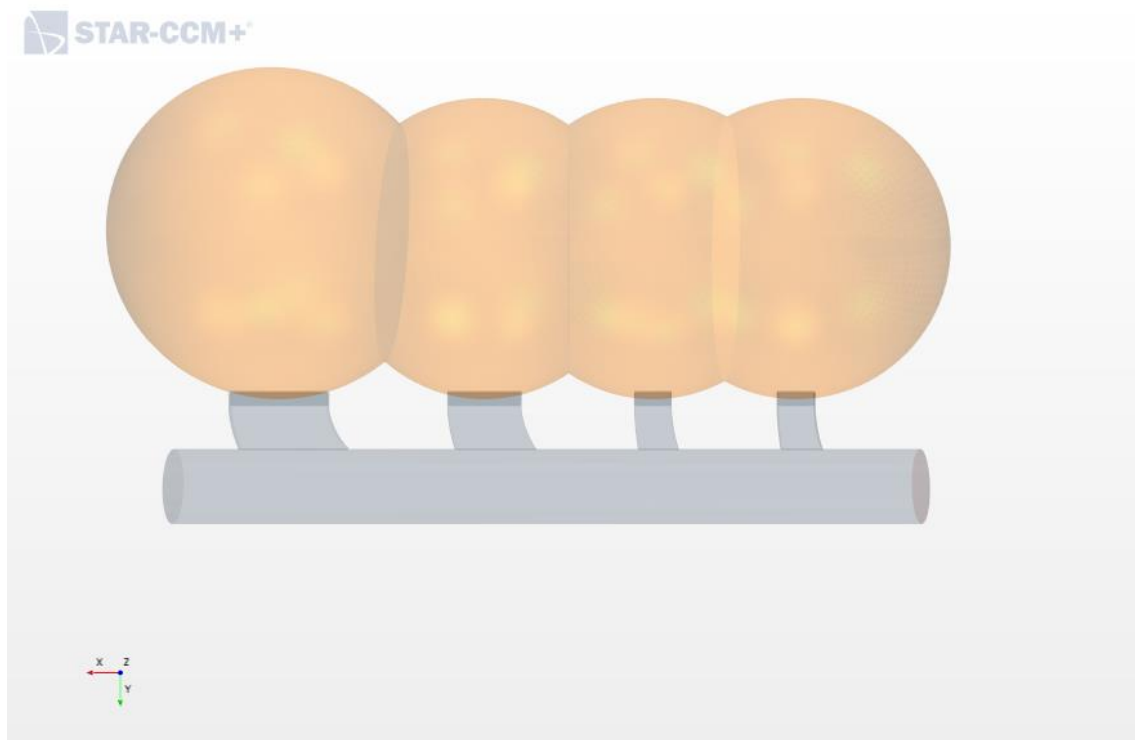


*Ilustración 97: Vectores de velocidad en la última rejilla en el diseño con ramales angulares*

Si se representan los vectores de velocidad en la última rejilla (la más problemática junto con la tercera) se observa el comportamiento del fluido en ella. El cambio de ángulo tan brusco genera una zona de recirculación en la parte izquierda de la misma, que además de desaprovechar esa zona de salida provoca un efecto de succión del flujo aumentando el desvío en esta dirección.

### 10.4.3. Ramales redondeados

En busca de mejores resultados se decide redondear la conexión entre tubería y rejillas mediante un giro más circular. El resultado se muestra a continuación, una transición más suavizada que conduzca mejor el aire sin cambios de dirección forzados:

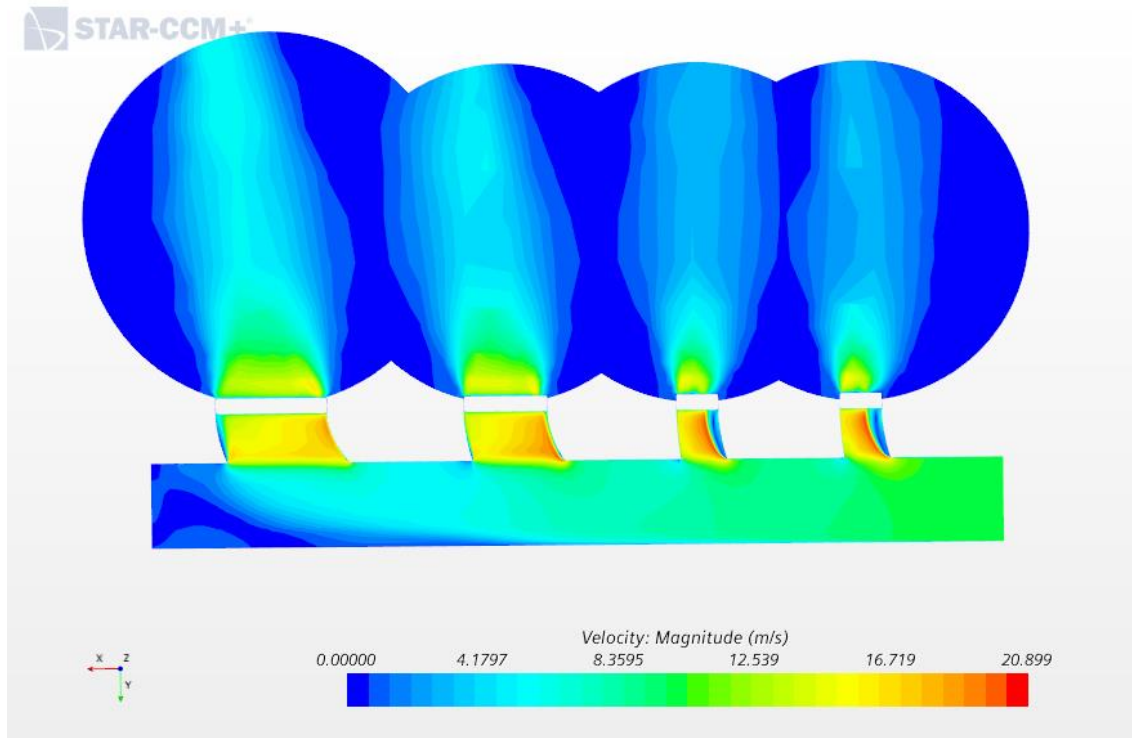


*Ilustración 98: Geometría y distribución de rejillas en el diseño con ramales redondeados*

Las conexiones se realizan girando el área interior de la rejilla, por lo que el resultado es un tramo de tubería con sección rectangular.

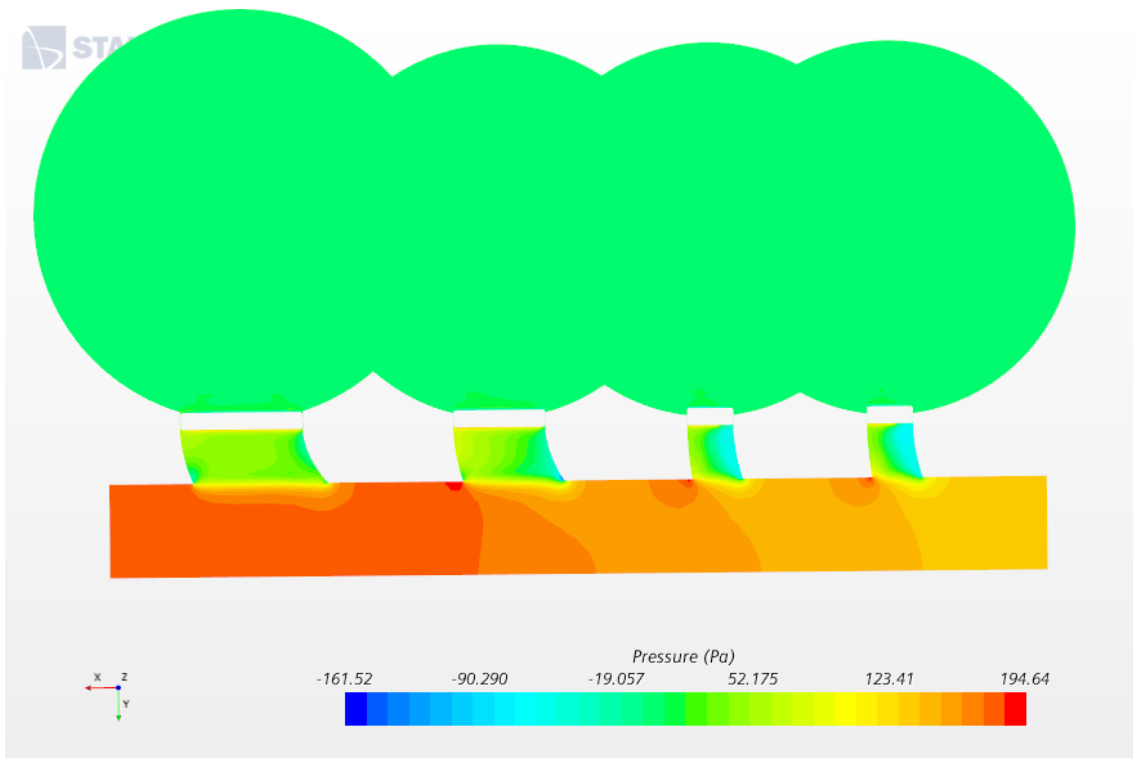


Para verificar la eficacia de este sistema se representa el escalar de velocidad en el plano central.



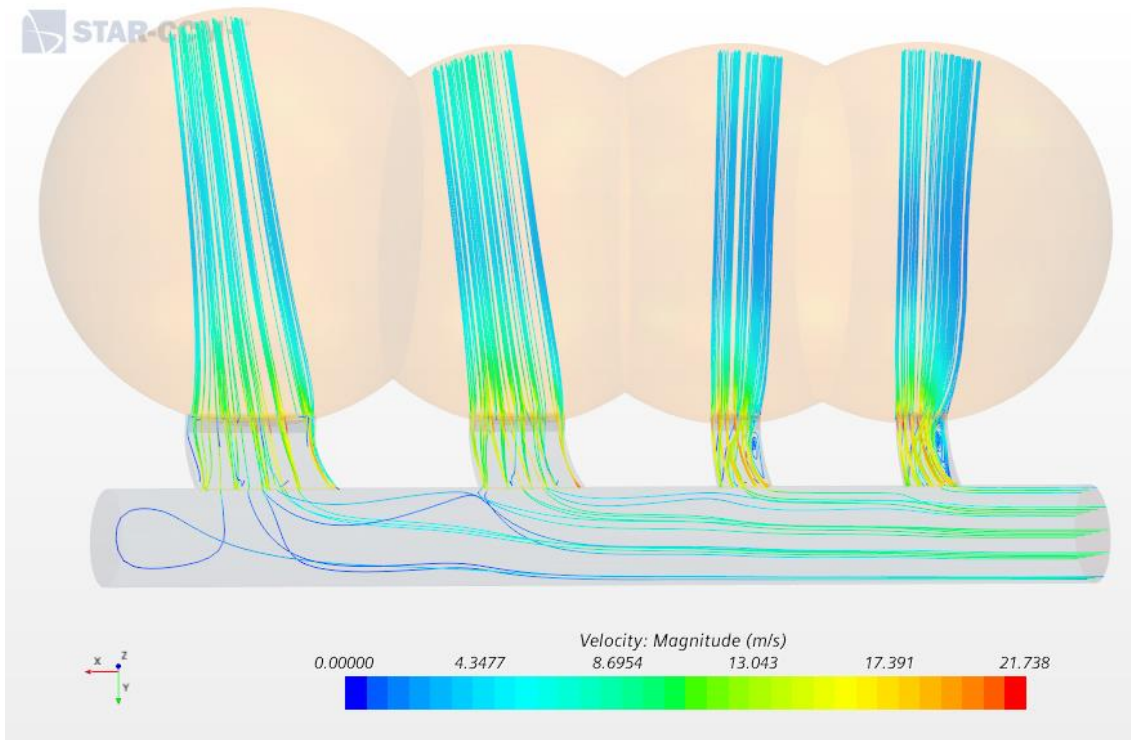
*Ilustración 99: Campo de velocidades en el diseño con ramales redondeados*

Con esta distribución de las rejillas se consiguen resultados satisfactorios, ya que el aire sale con cierta perpendicularidad. Sin embargo, en las dos primeras rejillas (las más pequeñas) se da un desvío en sentido contrario. Esto se debe a una pequeña rotación del tramo que une la tubería y rejilla. Por eso se forma una zona de baja velocidad y posible recirculación en el lateral derecho de las mismas.



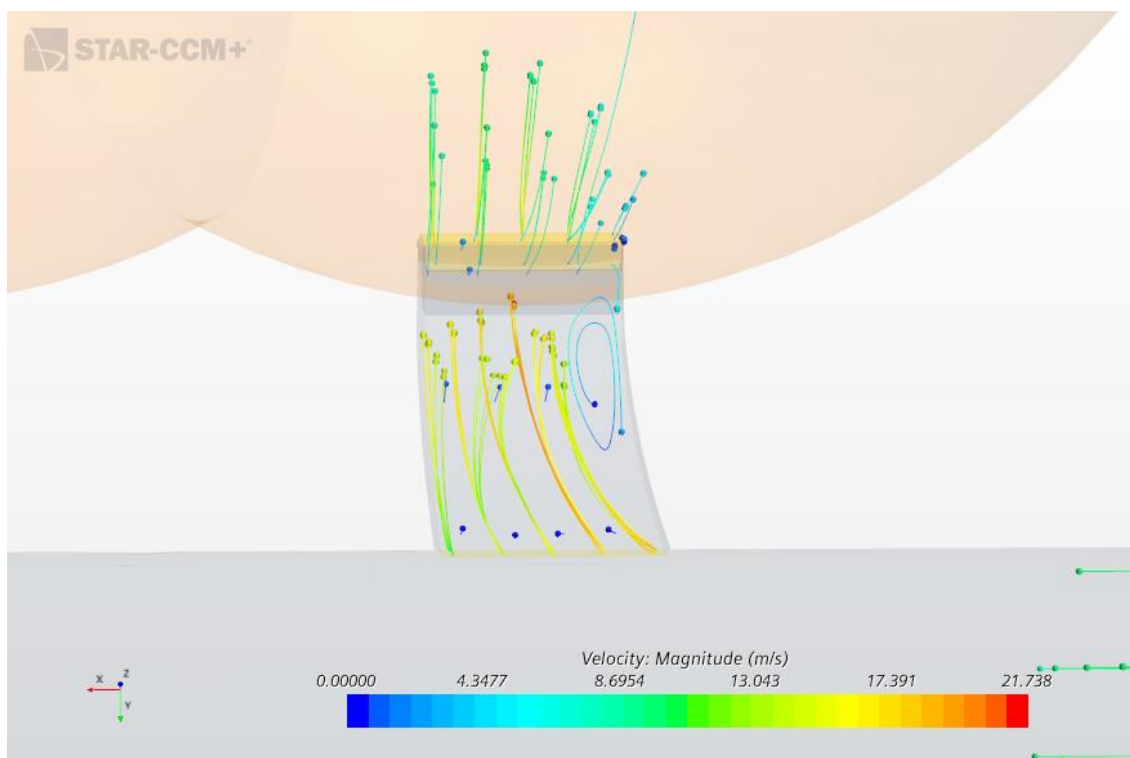
*Ilustración 100: Campo de presiones en el diseño con ramales redondeados*

La presión en el interior del ducto no es excesiva, pero las primeras rejillas presentan muy baja presión en la zona conflictiva.



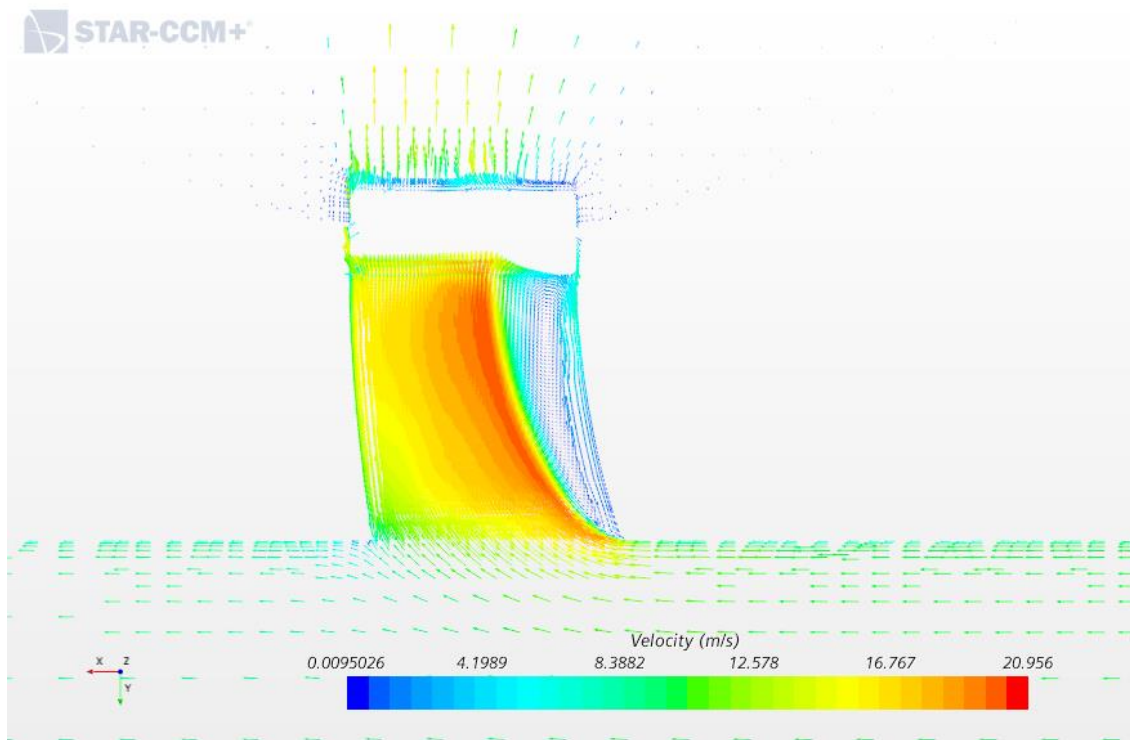
*Ilustración 101: Streamlines en el diseño con ramales redondeados*

Si trazamos las líneas de flujo, observamos las direcciones de salida predominantes, así como el comportamiento del fluido en el interior de la tubería. Asimismo, se vislumbra la causa del desvío en los primeros orificios.



*Ilustración 102: Ampliación de las streamlines en la primera rejilla*

Si ampliamos la Ilustración 101 sobre la primera rejilla y pausamos la animación de las líneas de corriente en el instante en el que el aire circula a través de ella, se ve con mayor claridad lo que ocurre: el aire ingresa en el primer tramo con componente axial y gran velocidad. El punto de conexión no tiene un redondeo suficiente para reconducir dicha componente axial, por lo que ocurre una situación similar a la acontecida en la última rejilla de la simulación previa (Ilustración 97). Es decir, esa zona de baja presión genera una zona de recirculación a muy baja velocidad, pero absorbe el flujo más cercano a esta zona. Es por ello que la dirección de salida se ve alterada en la dirección opuesta a la habitual por el flujo temprano.



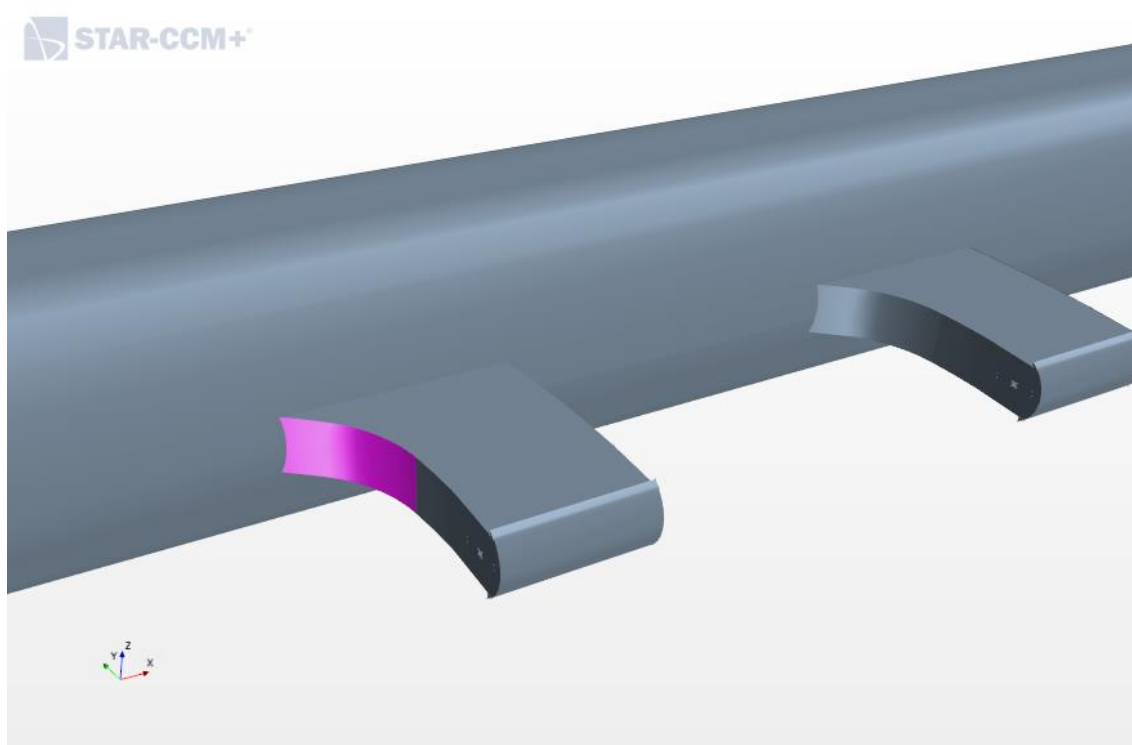
*Ilustración 103: Vectores de velocidad en la primera rejilla en el diseño con ramales redondeados*

Aunque no sea la situación idónea, pues se desea una salida perpendicular en cada una de las rejillas, este caso podría ser de especial utilidad en determinadas situaciones, como por ejemplo, en instalaciones en las que el aire ingrese en la tubería anterior a las rejillas por un ducto central, para posteriormente distribuir el aire en dos tramos de tuberías con dirección opuesta. Siendo el objetivo principal ventilar la zona central del edificio, por ser esta la más expuesta a contaminantes, el desvío del flujo en las primeras rejillas podría ayudar a este propósito y mantener el resto de salidas en la dirección correcta.

No obstante, el torbellino de estos tramos podría producir daños en la lama o tramo de tubería, así como notables efectos sonoros no deseados.

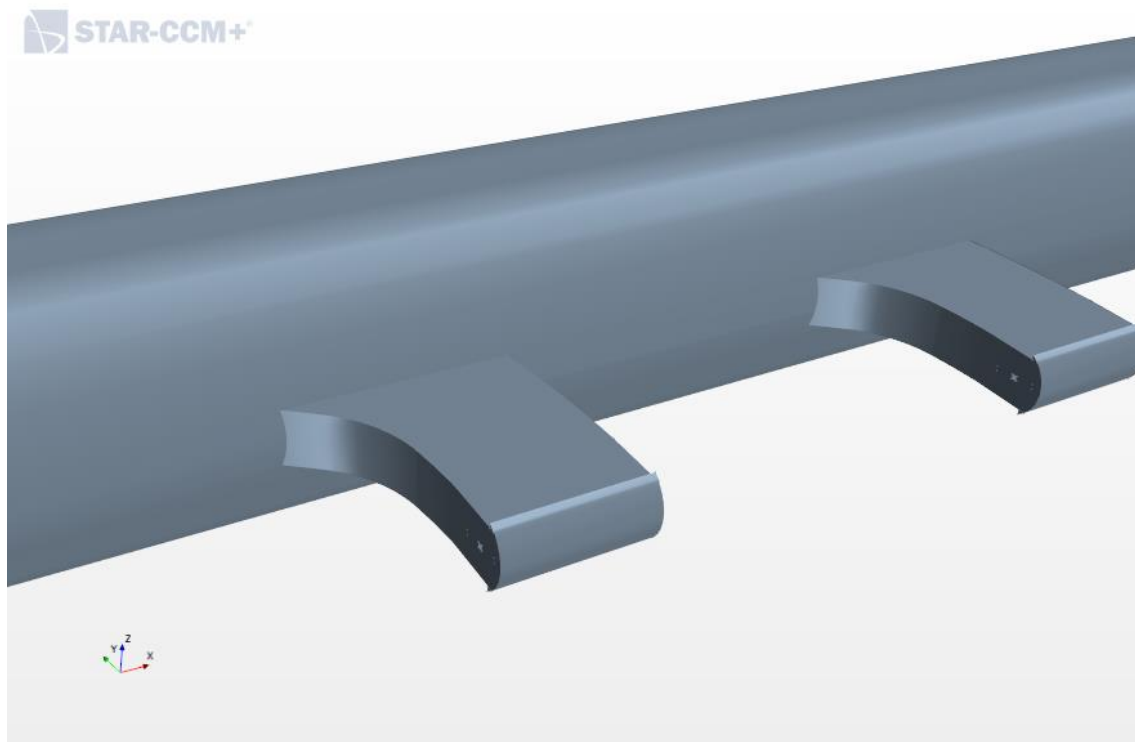
#### 10.4.4. Ramales redondeados perfeccionados

Finalmente, se optimiza el diseño propuesto con anterioridad mediante la adición de una superficie con mayor redondeo en las dos primeras rejillas. Se estima que con un cambio de dirección más progresivo se minimizará el efecto del flujo temprano, ayudando a una mayor uniformidad en la abertura. En la ilustración siguiente (Ilustración 104) se muestra la superficie redondeada resaltada en rosa.



*Ilustración 104: Suavizado de la curva derecha de las primeras rejillas*

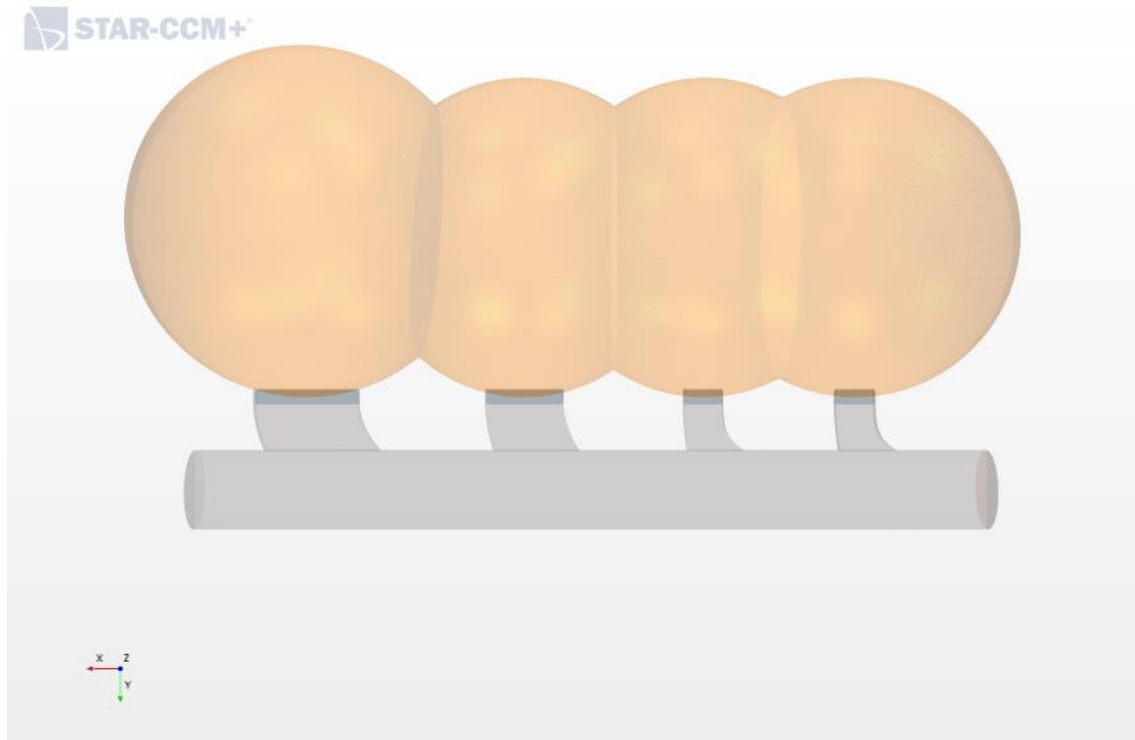
Las rejillas cercanas a la entrada quedarían de este modo:



*Ilustración 105: Resultado tras el suavizado en las primeras rejillas*



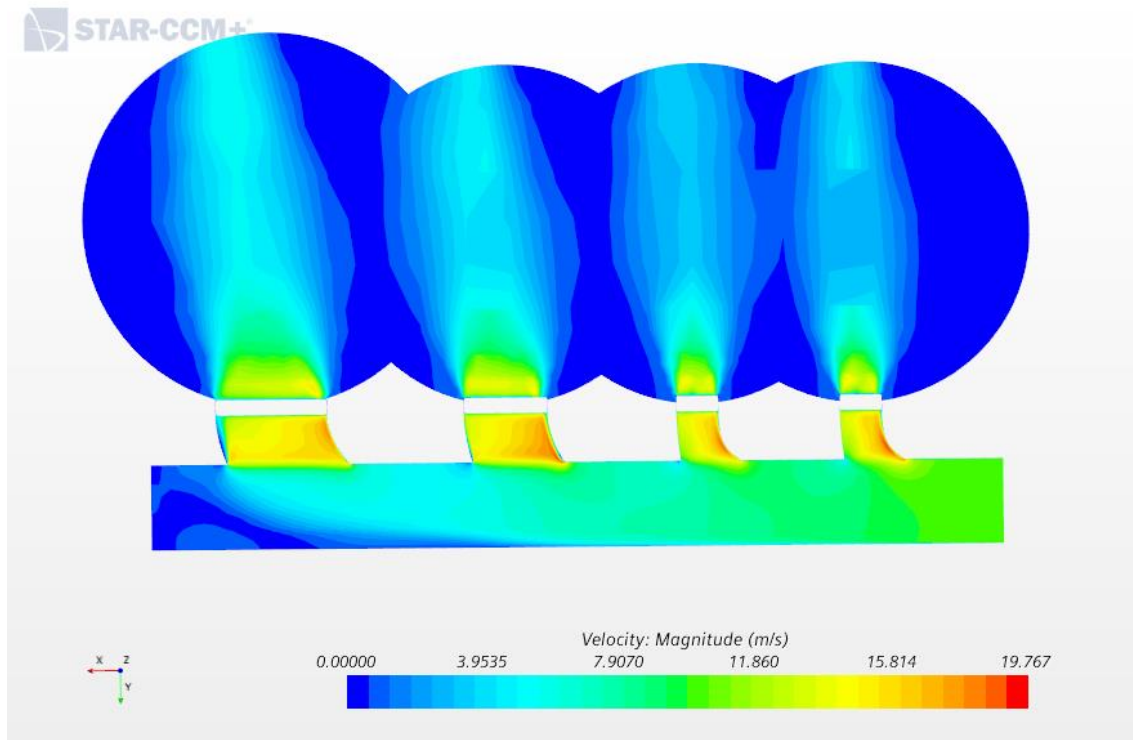
El resultado completo sería el mostrado a continuación, en el que se enseña la distribución y diseño de cada una de las rejillas con sus tramos correspondientes.



*Ilustración 106: Geometría y distribución de las rejillas en el diseño con ramales perfeccionados*

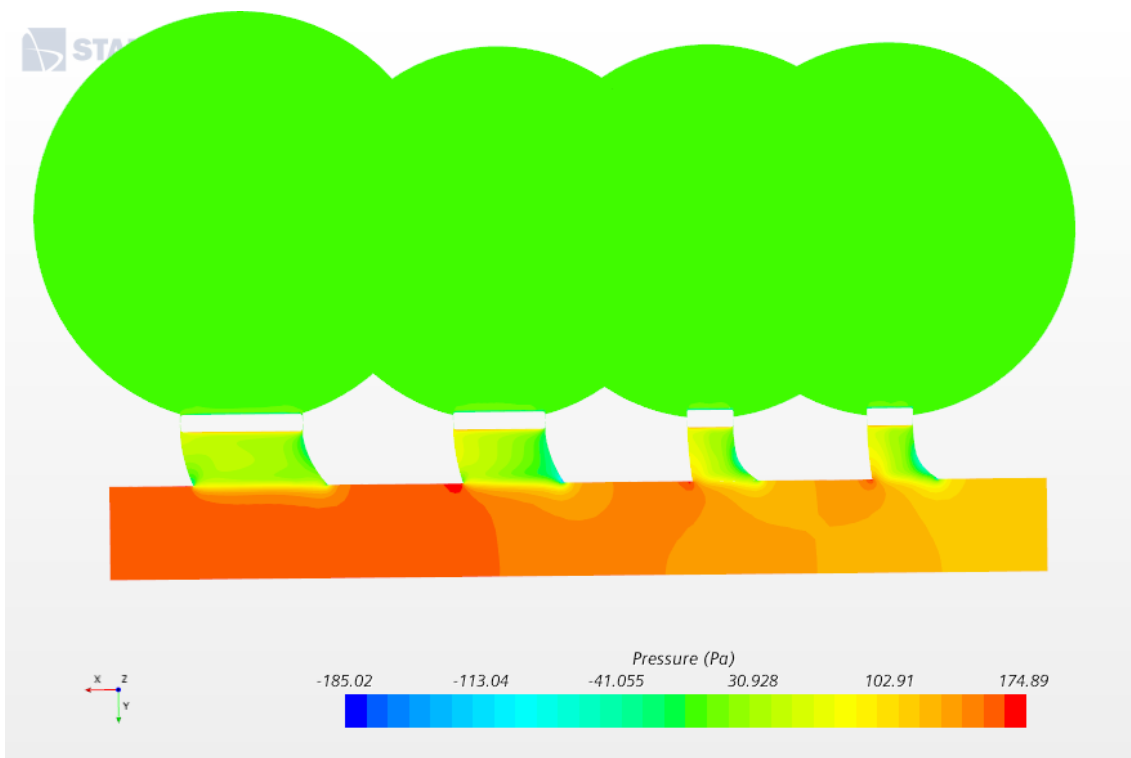


Se calculan los parámetros necesarios para el análisis:



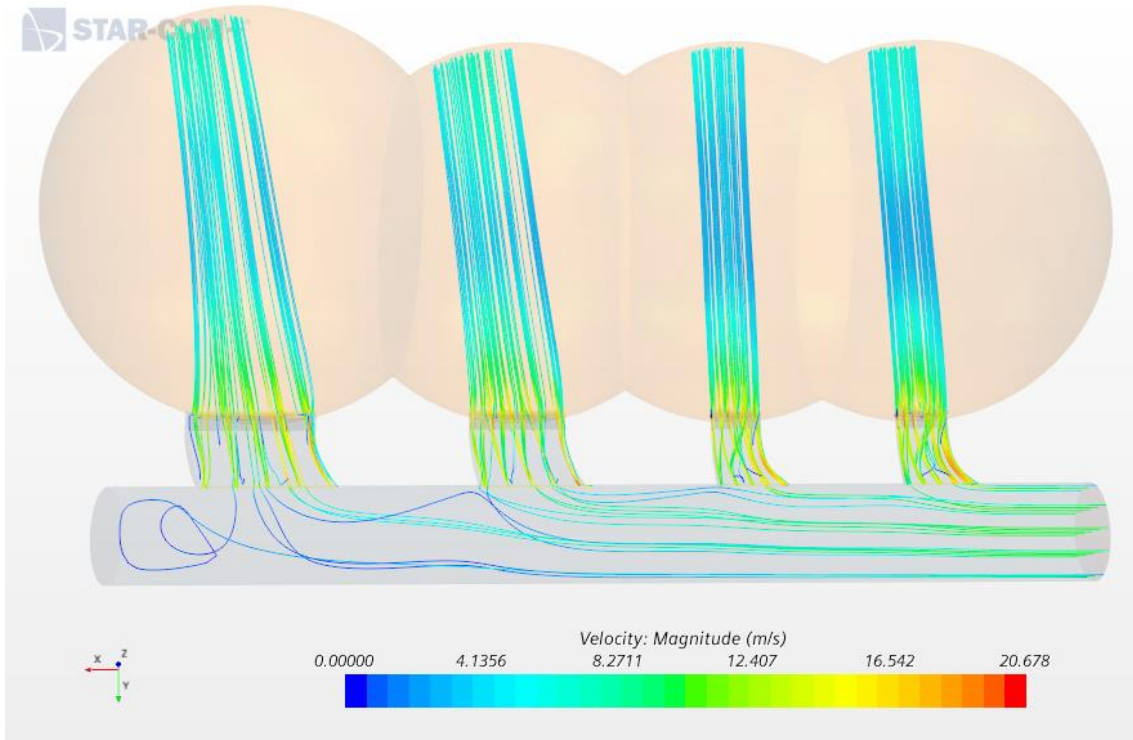
*Ilustración 107: Campo de velocidades en el diseño con ramales perfeccionados*

Se verifica el sentido del aire con el escalar de velocidad, que se observa uniforme y con poca desviación. Se dan velocidades bastante altas en las zonas redondeadas, pero se reconduce el flujo temprano, por lo que la salida es más perpendicular.



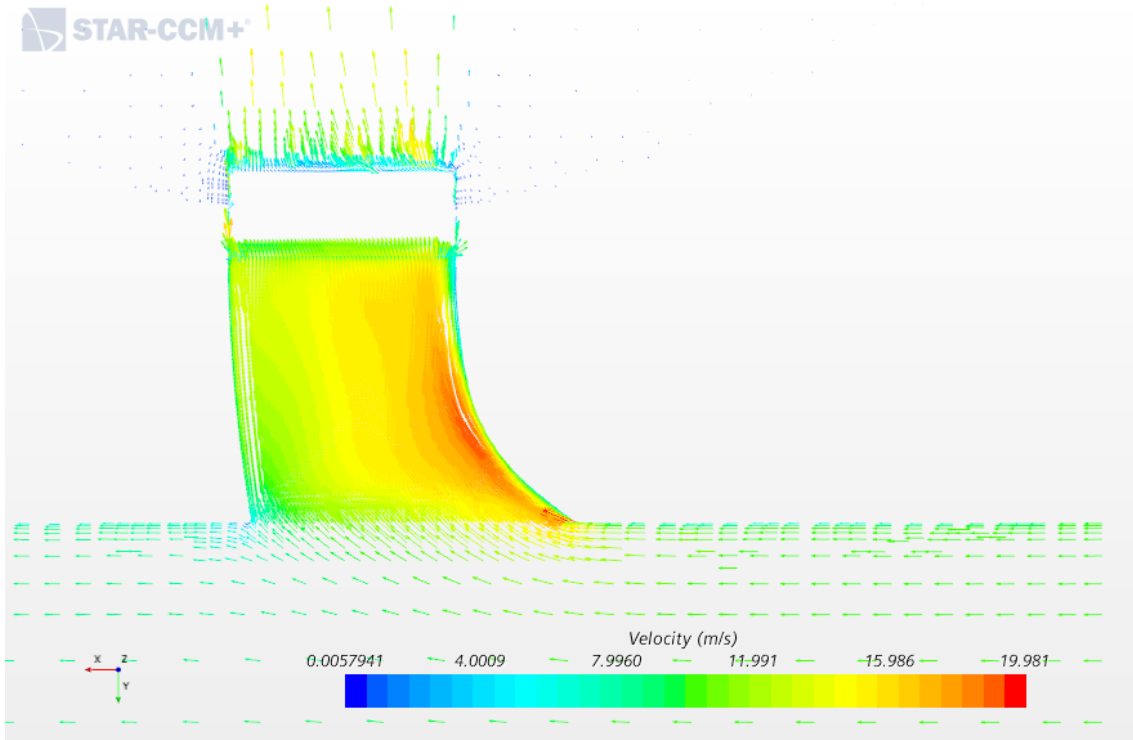
*Ilustración 108: Campo de presiones en el diseño con ramales perfeccionados*

Los valores de las presiones siguen sin ser muy altos, lo que es conveniente para evitar un gasto energético excesivo por el sistema de impulsión.



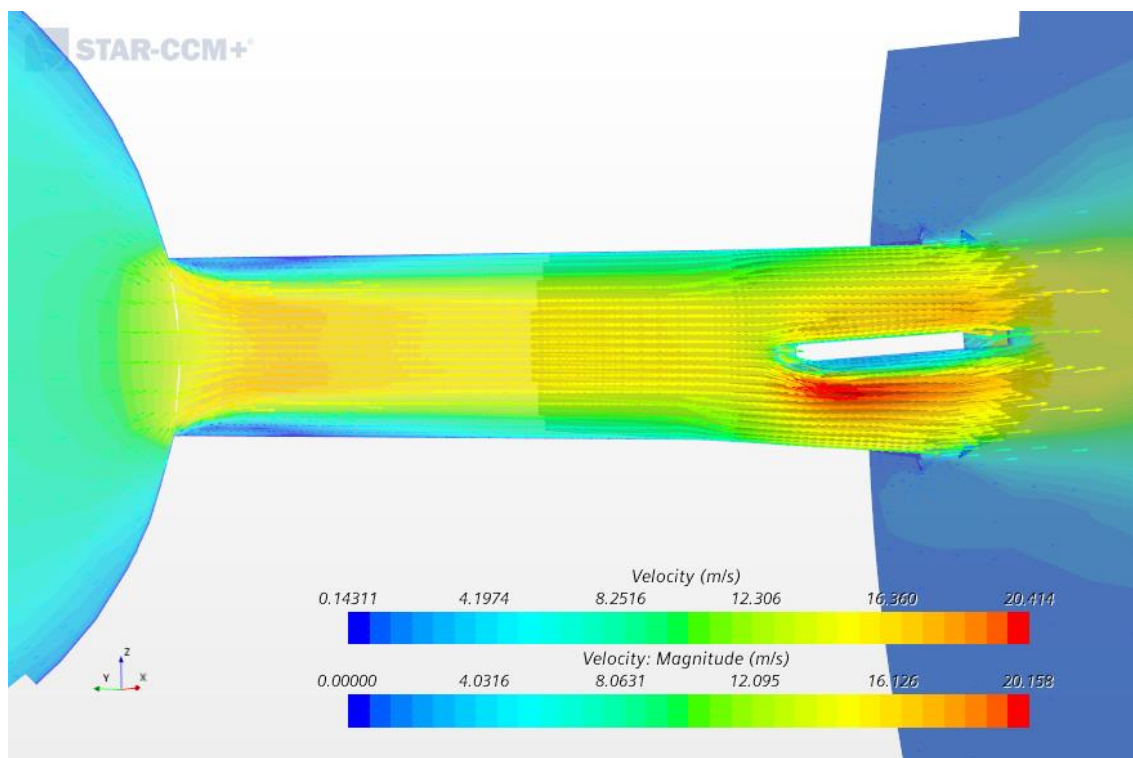
*Ilustración 109: Streamlines en el diseño con ramales perfeccionados*

Observando las líneas de flujo comprobamos un comportamiento similar en las últimas rejillas, además de corregir los efectos adversos de las primeras.



*Ilustración 110: Vectores de velocidad en la primera rejilla en el diseño con ramales perfeccionados*

Se representan los vectores de velocidad en la primera rejilla, para verificar esa corrección del flujo y el comportamiento en la misma.



*Ilustración 111: Detalle de la sección transversal conexión-rejilla 3*

Para terminar, se representan los vectores en la sección transversal de la rejilla 3. Al no disponer de transiciones suavizadas, se visualiza también el efecto de contracción de la vena fluida, aunque al disponer de un tramo de mayor longitud la vena fluida se expande para ocupar la altura completa.

Esta configuración, por lo tanto, permite una reducción del desvío muy aceptable (consiguiendo ortogonalidad satisfactoriamente), homogeneidad en las velocidades de salida de las rejillas y una reducción considerable de la presión generada en el interior del conducto. Otro beneficio que aporta esta estructura es la de un mayor aprovechamiento de la sección de la rejilla; es decir, se aprovecha el área completa de la rejilla por la que el aire fluye, mientras que en el resto de casos se desaprovecha la parte inicial de las mismas. Sin embargo, este sistema requiere un trabajo más costoso tecnológicamente y económicamente, pues se necesita fabricar la conexión tubería-rejilla e instalarla en el interior de la misma de forma que no suponga un obstáculo significativo al flujo.

## 10.5. Diseño con transición suavizada (boca acampanada)

Como se ha comentado en el apartado *Transiciones suavizadas (boca acampanada)*, se propone un diseño alternativo de boca de conexión entre tubería y rejilla. Es decir, en lugar de un cambio brusco entre el perímetro circular y la sección rectangular de la rejilla, se realiza una transición suavizada mediante un redondeo de la conexión. Para ello se sitúa una boca acampanada que permita pegarse al flujo de aire a la pared, en lugar de contraer la sección de la vena fluida (o vena contracta).

La superficie redondeada se resalta en rosa en la siguiente ilustración (Ilustración 112).

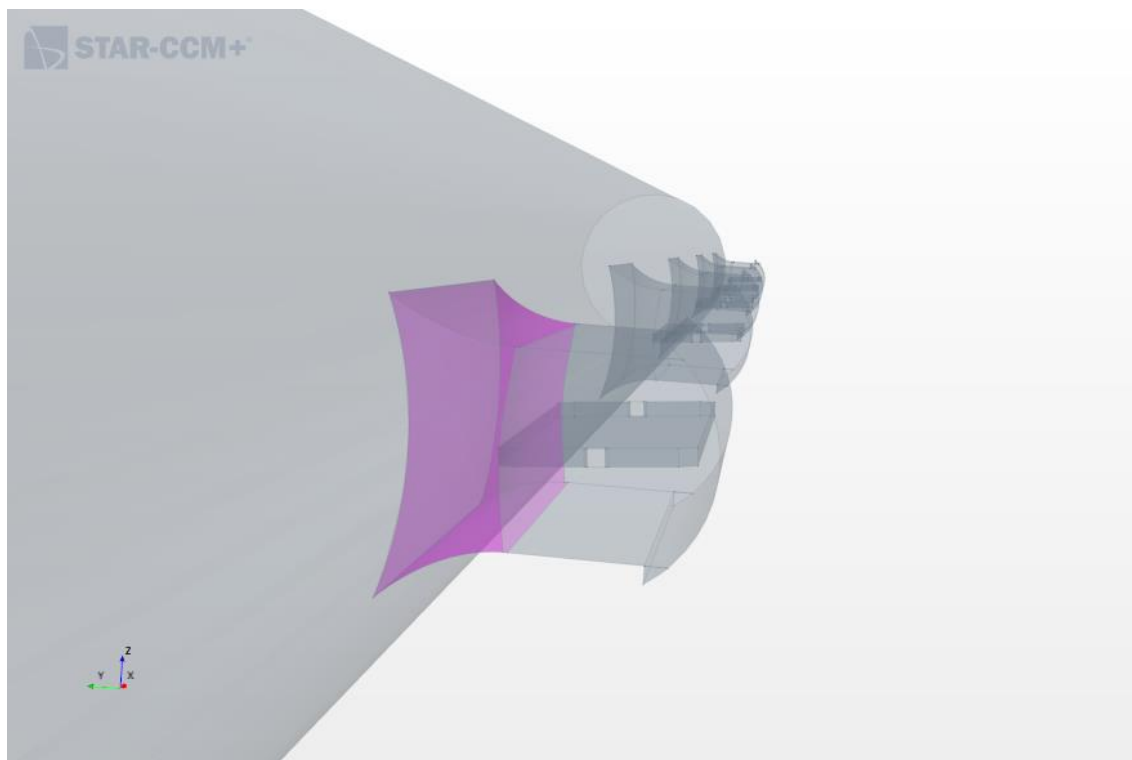


Ilustración 112: Redondeo de la boca de conexión conducto-rejilla

Siendo así, el resultado sería el que se observa. Cabe destacar que el redondeo se lleva a cabo también en los laterales buscando también suavizar ligeramente los efectos del flujo temprano. Se adjunta una vista en planta de los casos correspondientes a longitudes de rejilla de 200 y 800 mm.

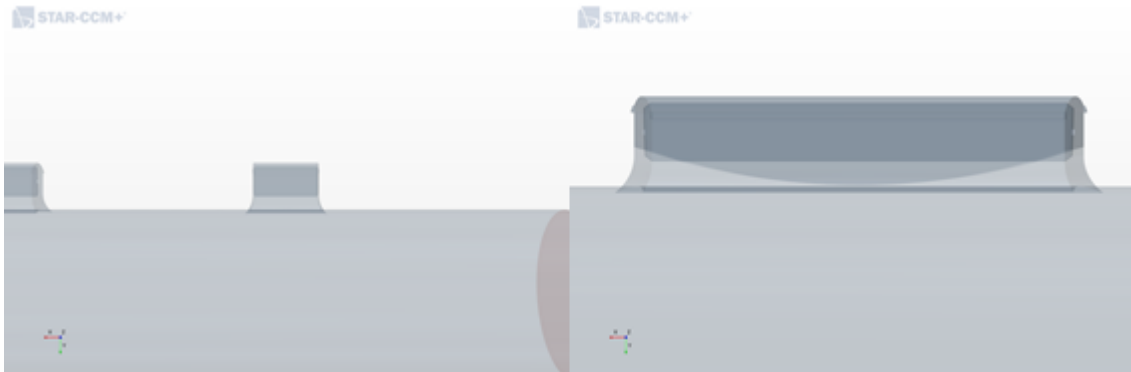


Ilustración 113: Vista en planta de la geometría de la rejilla 1 (longitudes de 200 y 800 mm de izquierda a derecha)

Para la realización de la misma se decide mantener la condición de contorno a la salida, que establece una presión en el extremo opuesto de la tubería, permitiendo un flujo a través del mismo.

El objetivo principal es evitar la contracción del flujo a la entrada de las rejillas, efecto visible mediante la sección transversal de la misma. Podemos concluir que el redondeo propuesto evita dicho fenómeno, pues en los resultados obtenidos no se atisba presencia del mismo.

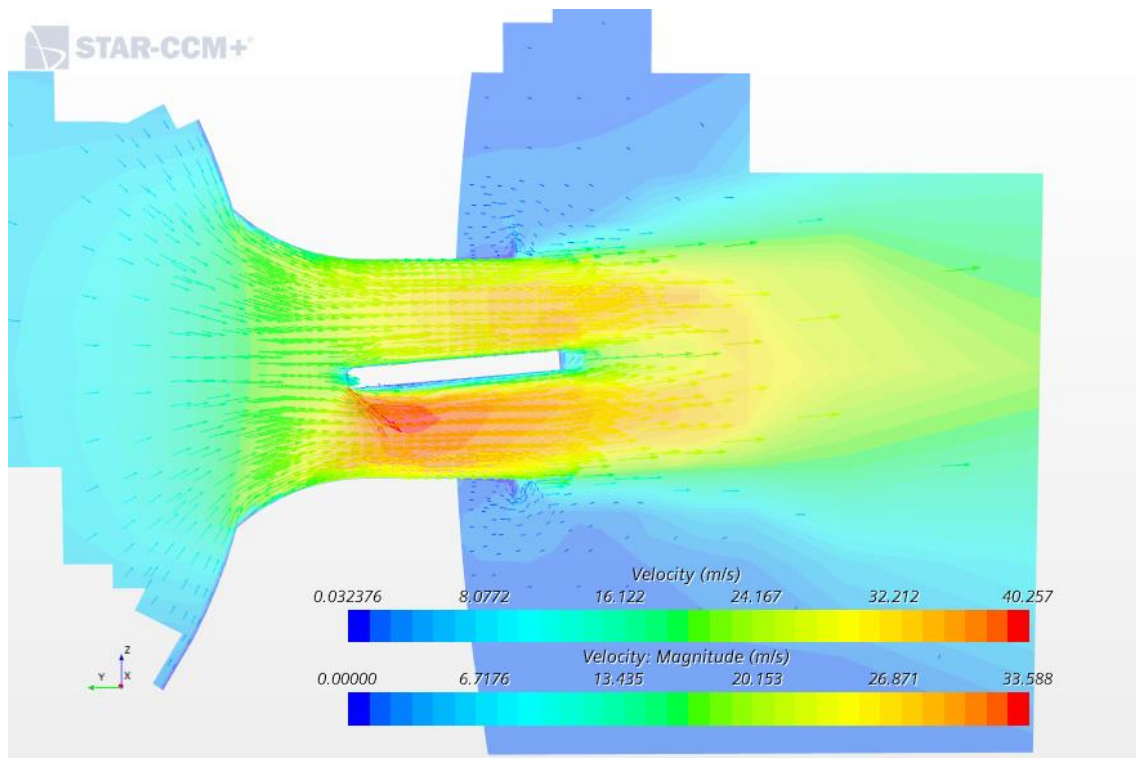
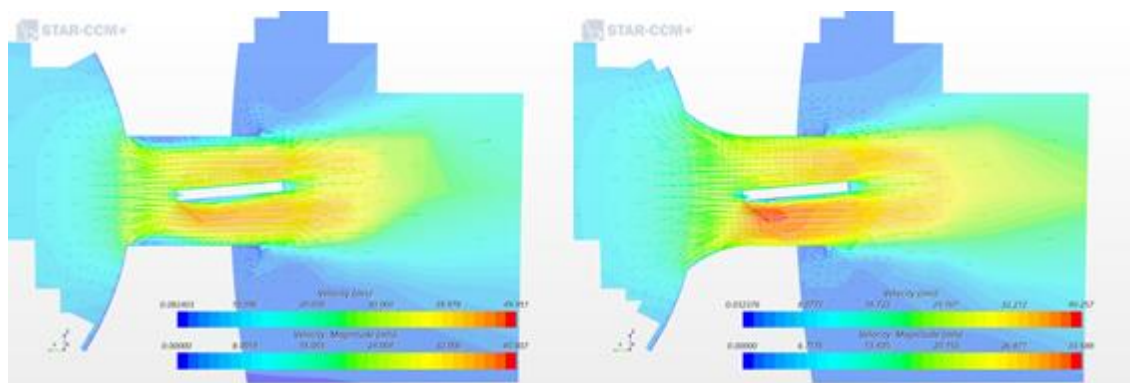


Ilustración 114: Velocidad en la sección transversal conducto-rejilla (longitud de 200 mm)



El aire ingresa de forma más gradual, adaptándose a la geometría representativa de la pared interior. Asimismo, se verían reducidas las pérdidas generadas por estas conexiones, que, aunque a priori pudieran ser pequeñas, podrían resultar interesantes dada la vida útil de los sistemas de ventilación.

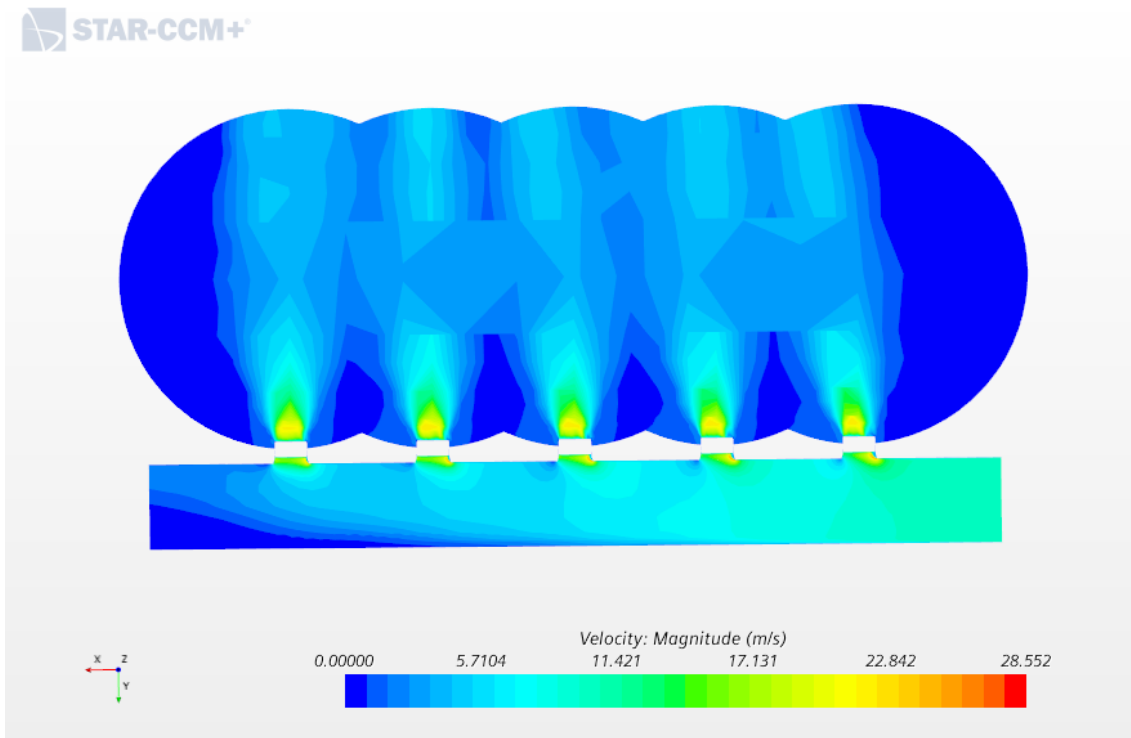
Al minimizar también las zonas de recirculación, se maximizaría el aprovechamiento de la sección total de los elementos de salida. Tal y como se puede observar en la siguiente imagen comparativa (Ilustración 115):



*Ilustración 115: Comparativa de velocidades en la sección transversal conducto-rejilla (longitud de 200 mm)*

Además de mejorar ese comportamiento, no se altera la dirección de salida del flujo de aire en el caso de la rejilla de 200 mm.

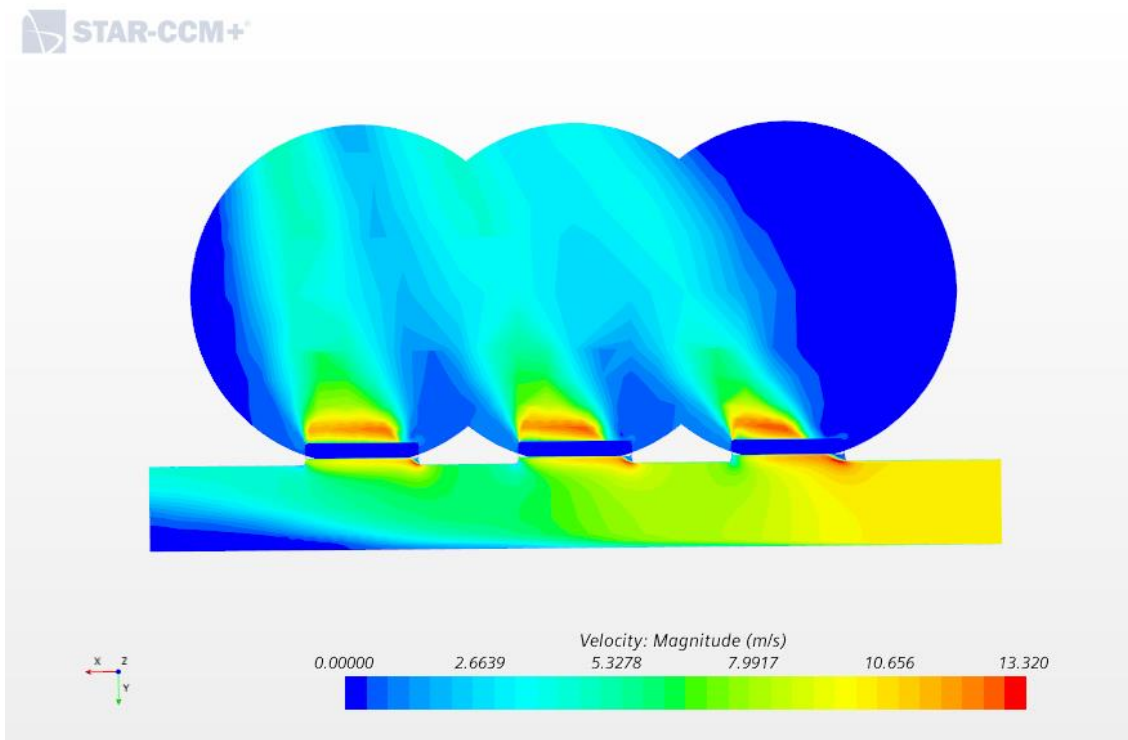




*Ilustración 116: Campo de velocidades con la tubería abierta y boca acampanada (rejilla de 200 mm)*

La desventaja de este diseño reside en la viabilidad técnica del mismo. Es decir, la complejidad a la hora de instalar la rejilla o de realizar la transición suavizada en el interior de la tubería limitan la efectividad de la alternativa propuesta, así como su coste adicional.

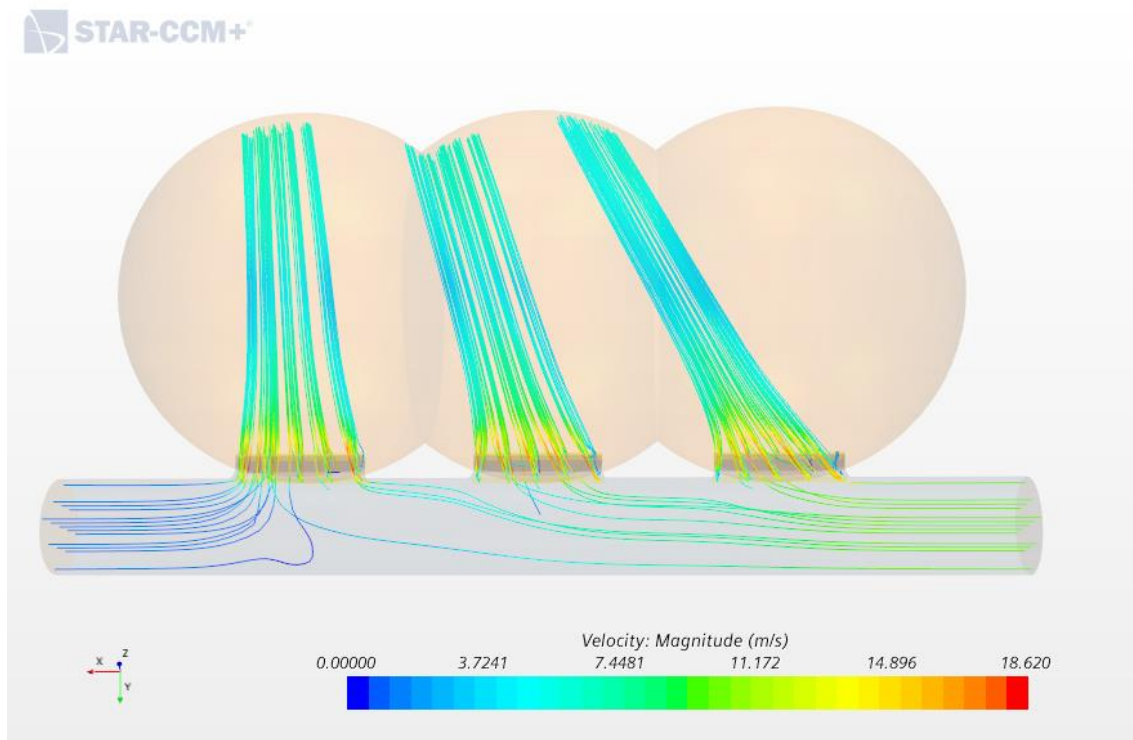
Cabe mencionar que se trata de una alternativa complementaria debido a la incapacidad de la misma de reconducir el flujo temprano, y con ello el desvío producido. Para un caso como el de la rejilla de 800 mm de longitud, en la que la perpendicularidad no está tan presente en el caso anterior, el redondeo no aporta mejoría en este aspecto por sí solo. Por lo que se requeriría de sistemas adicionales para reconducir la dirección del flujo, pudiendo incluir la boca acampanada para reducir pérdidas de carga a la entrada de los orificios.



*Ilustración 117: Campo de velocidades con la tubería abierta y boca acampanada (rejilla de 800 mm)*

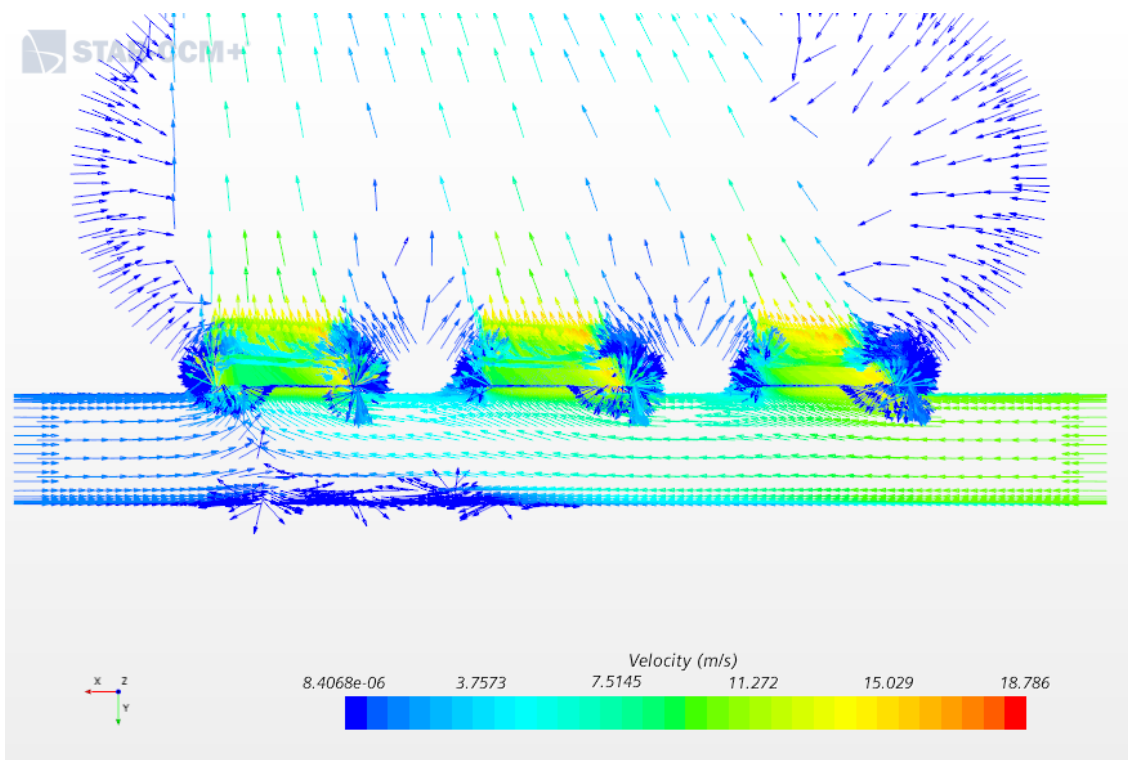
Si bien se han obtenido estos resultados, hay que destacar la necesidad de cambiar la presión a la salida por la inserción de aire por la salida teórica. El redondeo facilita la inserción del fluido en las rejillas, lo que reduce su velocidad aún más en el conducto, y, a su vez aumenta la presión y provoca que el aire deje de avanzar. Por ello, se decide simular con un valor inferior de presión, representando de esta manera con el mismo modelo de rejillas situadas antes en la tubería. Estos valores son de 350 y 100 Pa para los casos de 200 y 800 mm, respectivamente.

En caso contrario, los resultados no son fiables, ya que, como se ha dicho, entraría aire por el extremo opuesto en lugar de abandonar la tubería. Esto no sería realista tal y como se ve en la ilustración siguiente (Ilustración 118):



*Ilustración 118: Streamlines con la tubería abierta y boca acampanada (presión mal impuesta)*

Se visualiza mediante las líneas de flujo que en el extremo opuesto se da movimiento de aire a baja velocidad posiblemente en el sentido opuesto al deseado.



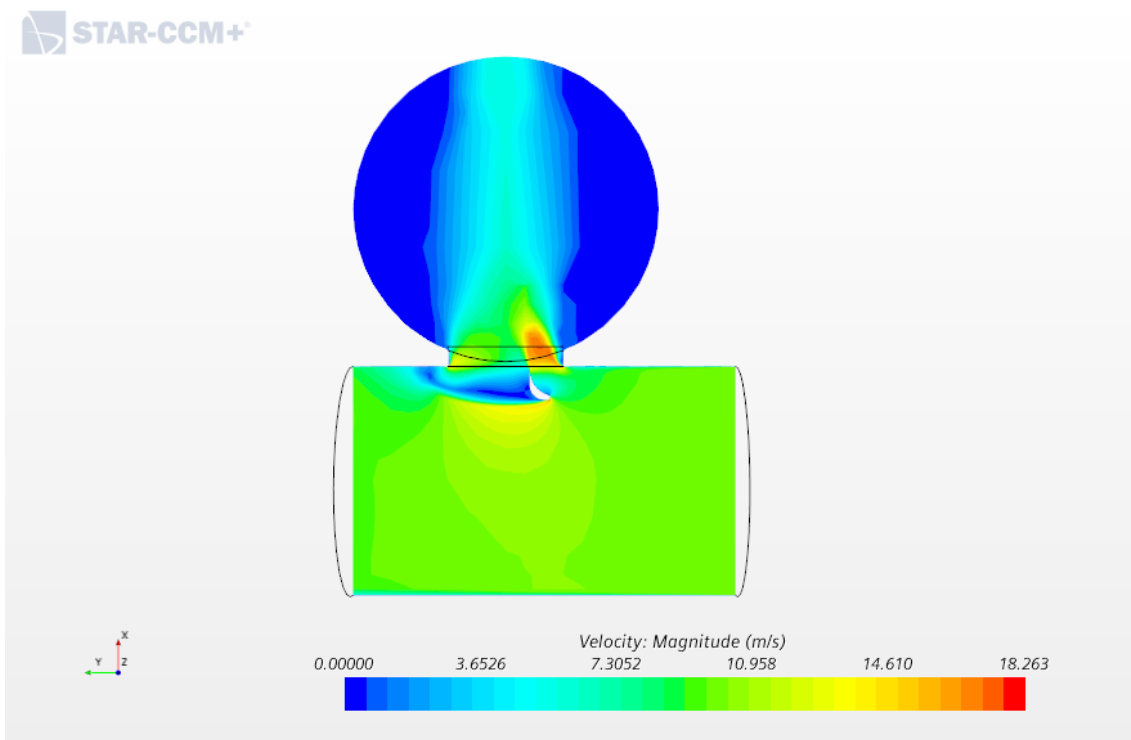
*Ilustración 119: Vectores de velocidad con la tubería abierta y boca acampanada (presión mal impuesta)*

A modo de comprobación se representan los vectores de velocidad a un tamaño aumentado (aunque sean a baja velocidad). Con esto se ve claramente una dirección errónea del flujo en el último tramo de tubería, causa por la que se decide reducir la presión impuesta a la salida para obtener resultados veraces.

Por consiguiente, y a modo de resumen, remarcar que la adición de dicho elemento, que se podría conseguir con una boca acampanada, no repercute en la dirección del aire, por lo que no es una alternativa eficaz para buscar una salida perpendicular. La utilidad de esta alternativa reside en añadirla de forma complementaria a un caso en el que ya se haya obtenido la direccionalidad deseada. De este modo, la pérdida de carga se vería reducida pudiendo mejorar su resultado, más si cabe.

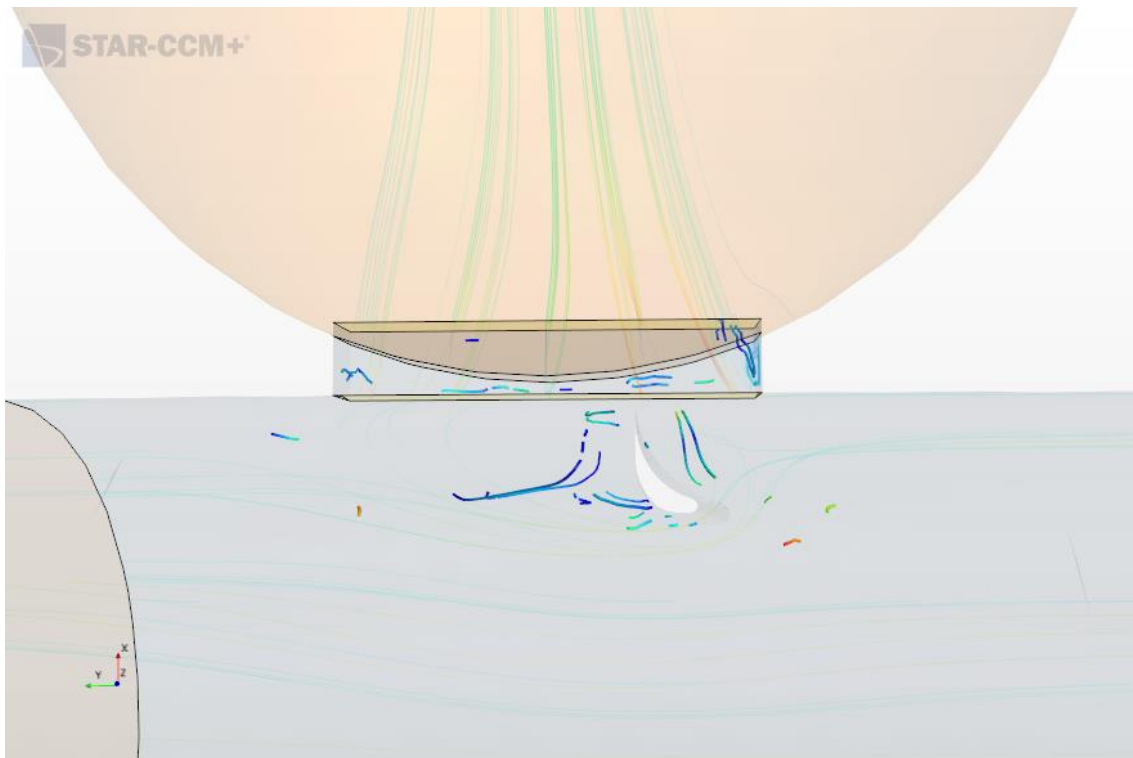
## 10.6. Elementos direccionadores

Al introducir un deflector, aun en este emplazamiento, las velocidades tanto dentro del conducto como de la rejilla se ven alteradas. La homogeneidad a la salida se ve perjudicada; esto unido a las perturbaciones creadas tras el paso por este elemento provocan el descarte de dicha alternativa.



*Ilustración 120: Campo de velocidades para el caso del deflector*

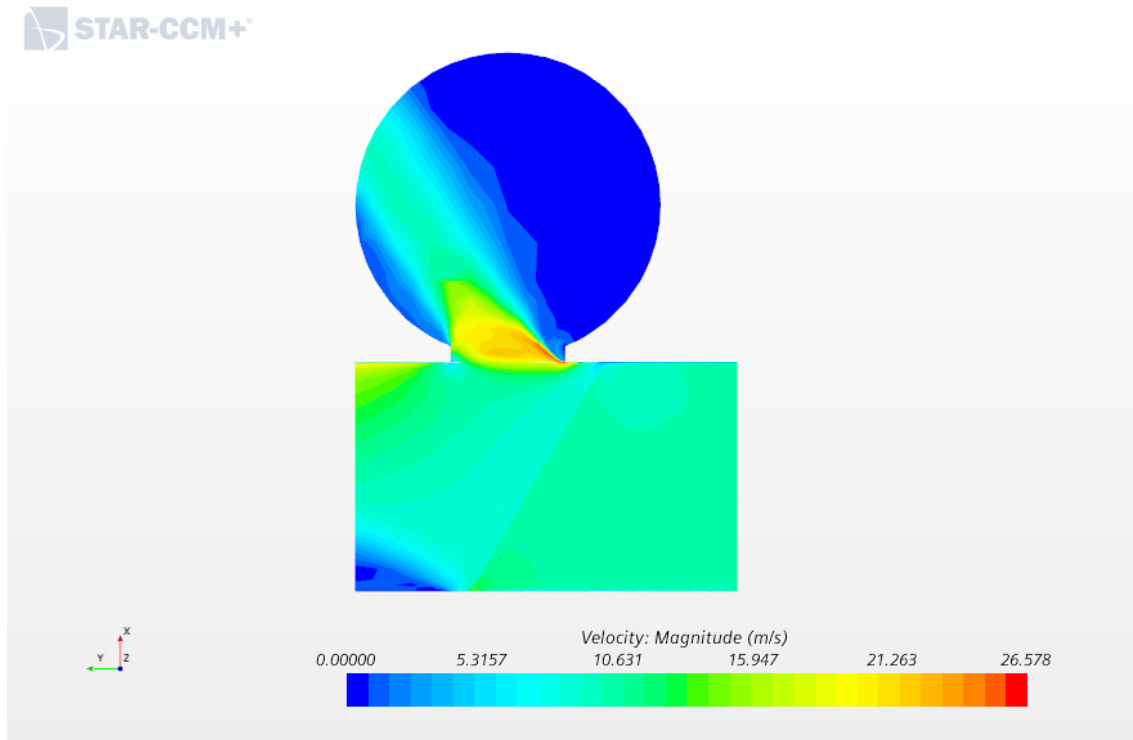
Aunque a priori pueda parecer que la dirección de salida sea la adecuada, la distribución a lo largo de la abertura no es uniforme. De forma adicional, los torbellinos y zonas de alta turbulencia creadas por la adición de semejante elemento se podrían propagar aguas abajo, pudiendo afectar de forma negativa al funcionamiento de las siguientes rejillas. Es por ello que se decide representar los núcleos de los vórtices creados, indicadores de zonas con posibles remolinos (Ilustración 121).



*Ilustración 121: Núcleos de vórtices para el caso del deflector*

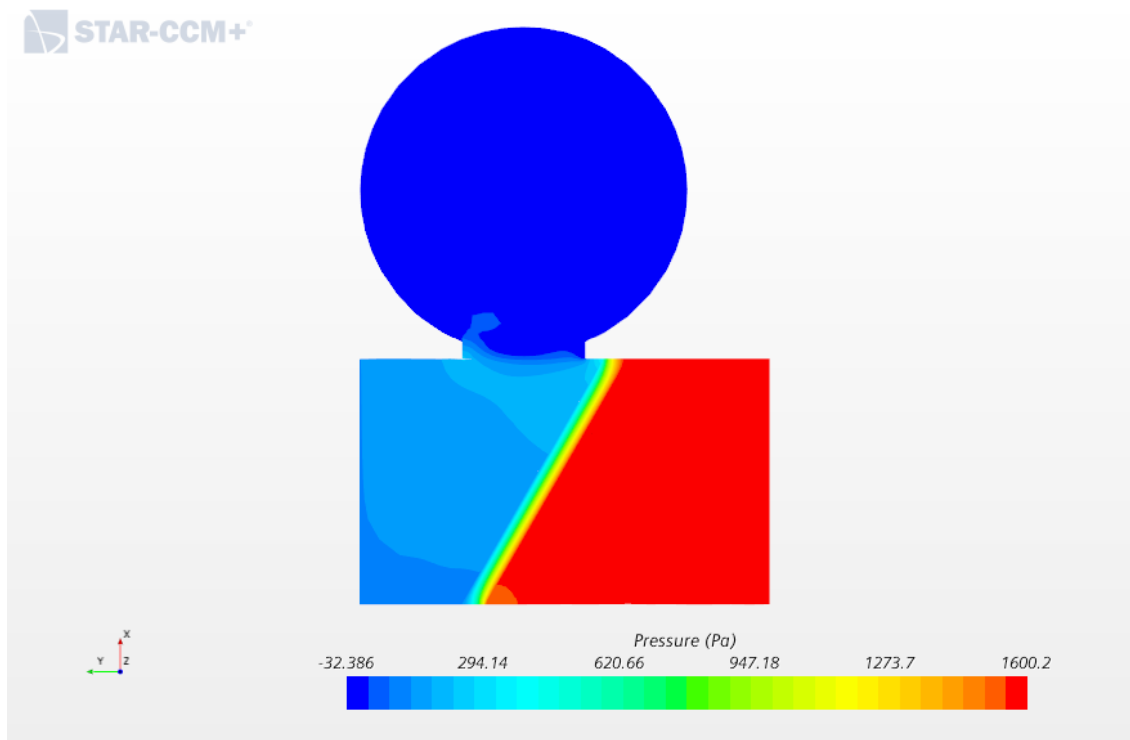
Asimismo, un aumento en las pérdidas de carga provoca que se desaconseje su uso en este caso en concreto.

Algo similar ocurre tras la adición del modelo de la malla, cuyos resultados pueden observarse a continuación (ilustraciones 122 y 123):



*Ilustración 122: Campo de velocidades para el caso de la malla perforada (disco)*

Se puede corroborar cómo el elemento adicional no consigue cumplir con el objetivo principal del estudio, que no es otro que la obtención de una salida perpendicular por la rejilla en cuestión. Si bien consigue que la trayectoria del aire que atraviesa la malla cambie no logra paliar el efecto del flujo temprano. Consecuencia directa de ello es también el desaprovechamiento del área útil de la rejilla, ya que la inercia axial del aire saliente provoca que gran parte de la parte derecha de la misma se convierta en una zona de recirculación y muy baja velocidad.

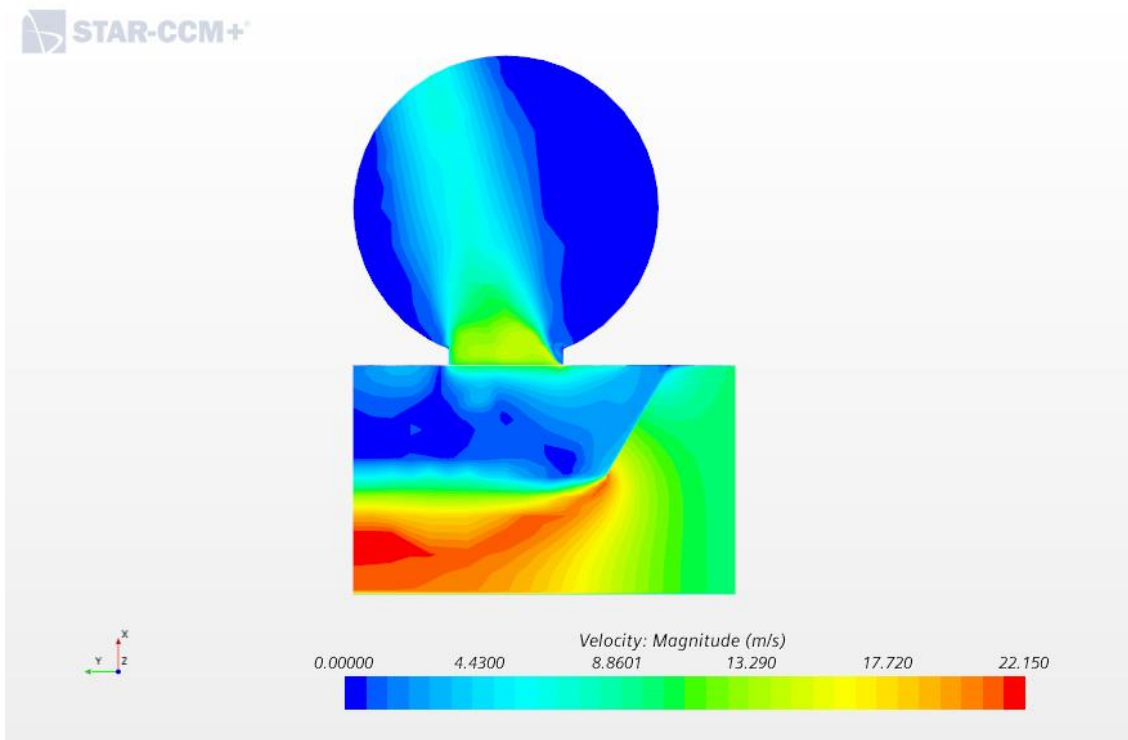


*Ilustración 123: Campo de presiones para el caso de la malla perforada (disco)*

Otro aspecto a remarcar es el de la caída de presión provocada por la introducción de dicho componente. Como se visualiza claramente en la Ilustración 123, las presiones en el interior del ducto son inaceptables y muy superiores a otros casos estudiados.

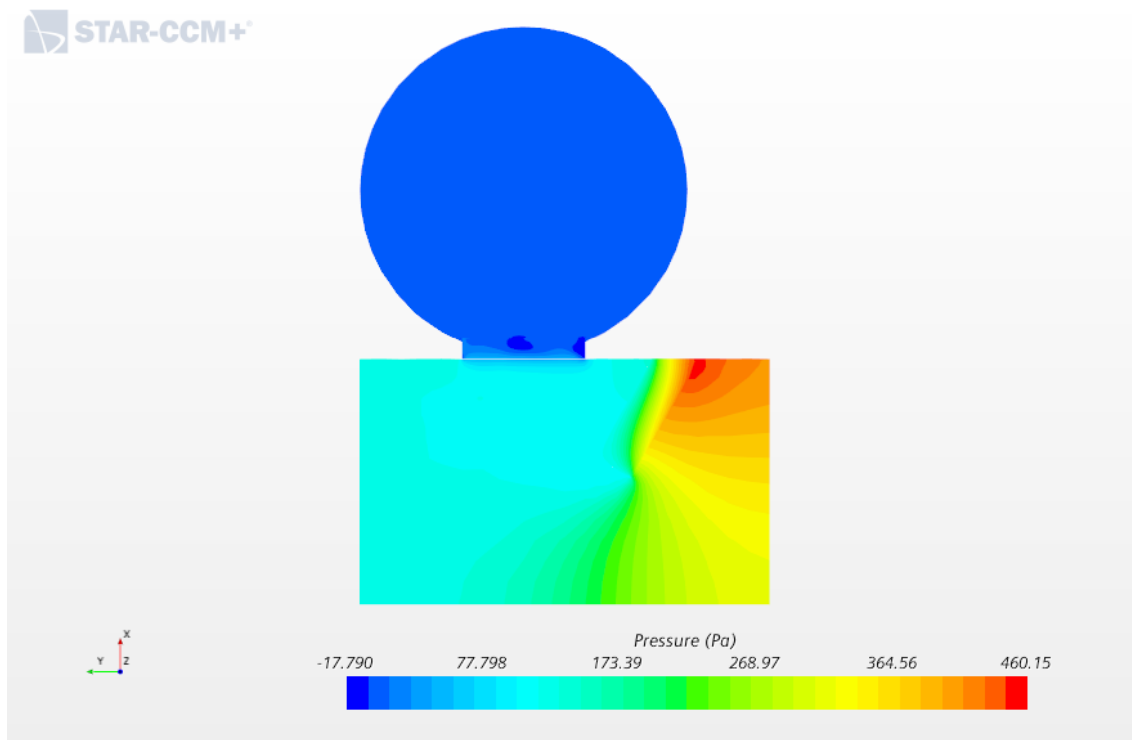
Una vez observados los efectos adversos que provoca la malla perforada de sección completa se desecha esta opción. Sin embargo, se decide realizar una nueva prueba reduciendo el área de acción de esta, cuyos resultados quedan representados en las ilustraciones siguientes (ilustraciones 124 y 125):





*Ilustración 124: Campo de velocidades para el caso de la malla perforada (disco parcial)*

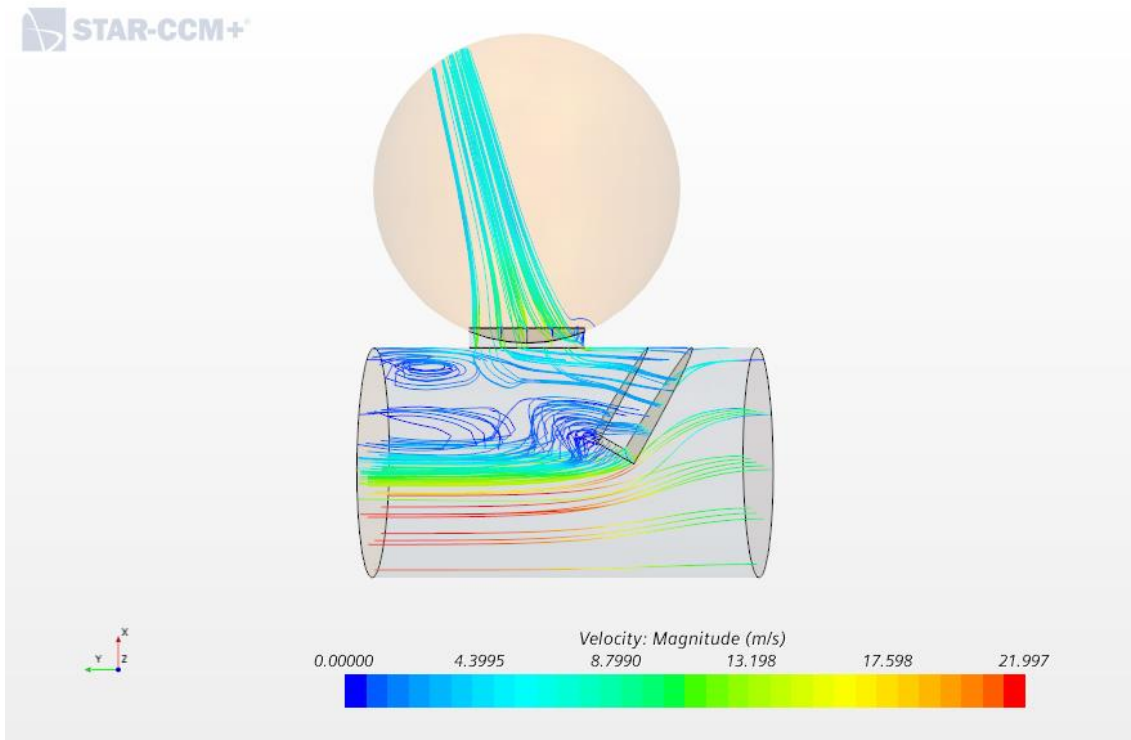
El empleo de un componente de estas características tampoco obtiene los resultados deseados; ya que, es apreciable el desvío dado al fluir por la tubería. El efecto del flujo temprano aún predomina, por lo que de igual manera lo hace el desaprovechamiento de la sección de la rejilla. Además, el gradiente de velocidades en el interior del ducto no es aconsejable por un aumento significativo de la misma en la parte más alejada de la rejilla, lo que podría generar mayores pérdidas primarias, y una reducción brusca tras el paso por la malla. Como se representará más adelante las perturbaciones generadas son considerables y los vórtices claramente apreciables.



*Ilustración 125: Campo de presiones para el caso de la malla perforada (disco parcial)*

Aunque la magnitud se reduce, el problema de las presiones persiste. El fuerte impacto en la parte más cercana de la malla a la rejilla provoca un aumento en la presión que se ve reducida de forma drástica tras cruzar los agujeros de esta.

Finalmente, se muestra la Ilustración 126 que contiene las líneas de corriente para el caso seleccionado, en la que se vislumbra una gran cantidad de remolinos que dan como resultado turbulencia y efectos adversos que puedan propagarse aguas abajo y resultar en un funcionamiento erróneo.



*Ilustración 126: Líneas de corriente para el caso de la malla perforada (disco parcial)*

Cabe destacar que se decide llevar a cabo las simulaciones en un tramo de conducto de limitada longitud a fin de agilizar el proceso de convergencia. Se trata por tanto de estudios preliminares para observar el comportamiento del fluido en una rejilla, que en caso de prosperar y obtener resultados favorables se habrían estudiado más a fondo incidiendo en su efecto en un sistema más completo.

## 10.7. Aspectos ergonómicos

Se concluye de este modo que de una combinación adecuada de las tres alternativas con resultados más favorables (el diseño con paso aumentado, la utilización de ramales y el empleo de la boca acampanada) podría resultar una configuración de rejilla óptima. Restaría por ello estudiar algunos aspectos ergonómicos que podrían afectar a la efectividad de la solución propuesta, entre los cuales destacan los siguientes:

- Las velocidades de salida; ya que en caso de ser excesivas podrían provocar efectos adversos en los operarios (siempre que la presencia de estos sea a tener en cuenta).
- La longitud de los ramales; ya que en caso de sobresalir demasiado podrían suponer un entorpecimiento a los trabajadores de la zona (siempre que la presencia de estos sea a tener en cuenta).

Como se ha mencionado con anterioridad a lo largo de este estudio, la presencia operaria en zonas de desodorización dista de acuerdo con la función principal de la estancia en cuestión. Esto es, existen zonas en las que la presencia sea esporádica y con una alta necesidad de ventilación, mientras que otras requieran esa necesidad de extraer y tratar el aire con presencia habitual de los mismos.

En caso de que se lleven a cabo trabajos de explotación y presencia operaria habitual, las velocidades de salida a través de las rejillas no debe exceder un límite, puesto que podrían formarse vibraciones y molestias auditivas, además de corrientes (fuentes de disminución del confort en la zona designada para tal finalidad). No obstante, no pueden ser demasiado bajas, ya que esto conduciría a un mal funcionamiento del sistema de ventilación y daría lugar a un peligro sanitario en potencia por encontrarse altas concentraciones de contaminantes.

Así pues, se estudia el modelo computacional utilizado variando la velocidad de entrada del aire al conducto. La reducción de dicha magnitud queda justificada por el funcionamiento del sistema de ventilación en su conjunto. Al introducir aire en una estancia en la que no se desea una velocidad excesiva, no tiene sentido impulsar el aire a través del conducto de entrada a una velocidad del mismo calibre, debido a que esto supondría que los elementos terminales tendrían que introducir unas pérdidas de carga elevadas (lo que no concuerda con uno de los objetivos principales del estudio). En lugar de ello se introduce el fluido en la tubería de impulsión a una velocidad acorde a la deseada a la salida.

Para simular esta suposición se estima una velocidad de entrada al entorno de simulación de 5 m/s (por los 10 m/s en los casos anteriores). En la siguiente ilustración (Ilustración 127) se visualiza el campo de velocidades para el caso de caudal reducido con el empleo de ramales redondeados (imagen superior) y para el caso base anteriormente estudiado (imagen inferior). En ella se aprecia que las velocidades en las rejillas oscilan entre valores cercanos a aquellos de su introducción en el ducto (5 m/s y 10 m/s, respectivamente). Un cálculo de las velocidades medias de las secciones de salida muestra valores de 5,4-5,7 m/s y 10,9-11,5 m/s para constatar las tendencias descritas en cada uno de los casos.

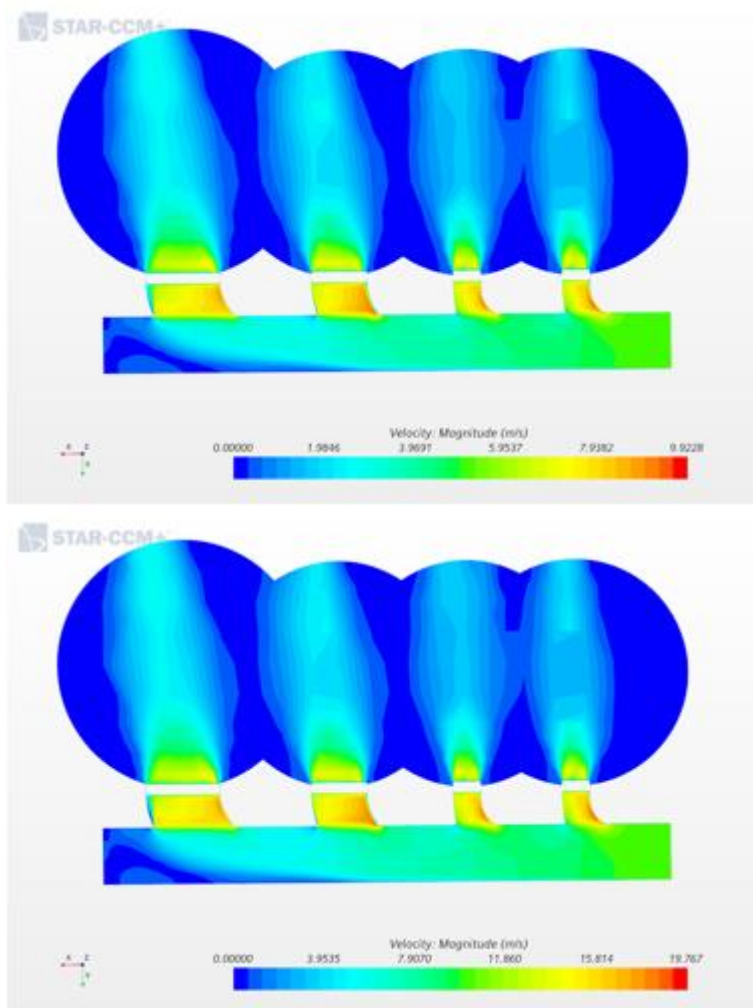


Ilustración 127: Campo de velocidades (velocidad de entrada de 5 y 10 m/s de arriba a abajo)

Se concluye, por tanto, que la velocidad de salida es dependiente de la velocidad de entrada, y que la alternativa propuesta no debería suponer un impedimento

por provocar molestias en los trabajadores. En caso de tener que transcurrir grandes periodos de tiempo en estas zonas o estar muy discurrecidas, la velocidad de entrada debería reducirse hasta un nivel aceptable, lo que no compromete la efectividad de los ramales.

En cuanto a la longitud de los ramales, se ha de revisar para que no entorpezca las labores de los operarios. Aunque la ubicación de numerosos conductos en estas estancias se encuentre habitualmente a grandes alturas cerca del techo, se dan excepciones en las que el mismo conducto puede estar situado a una altura media. La instalación de los ramales podría imposibilitar el paso a los operarios en zonas de trabajo estrechas o reducir la productividad y dificultar sus labores. En la Ilustración 128 se muestra una representación gráfica de este fenómeno realizado con el programa STAR-CCM+:



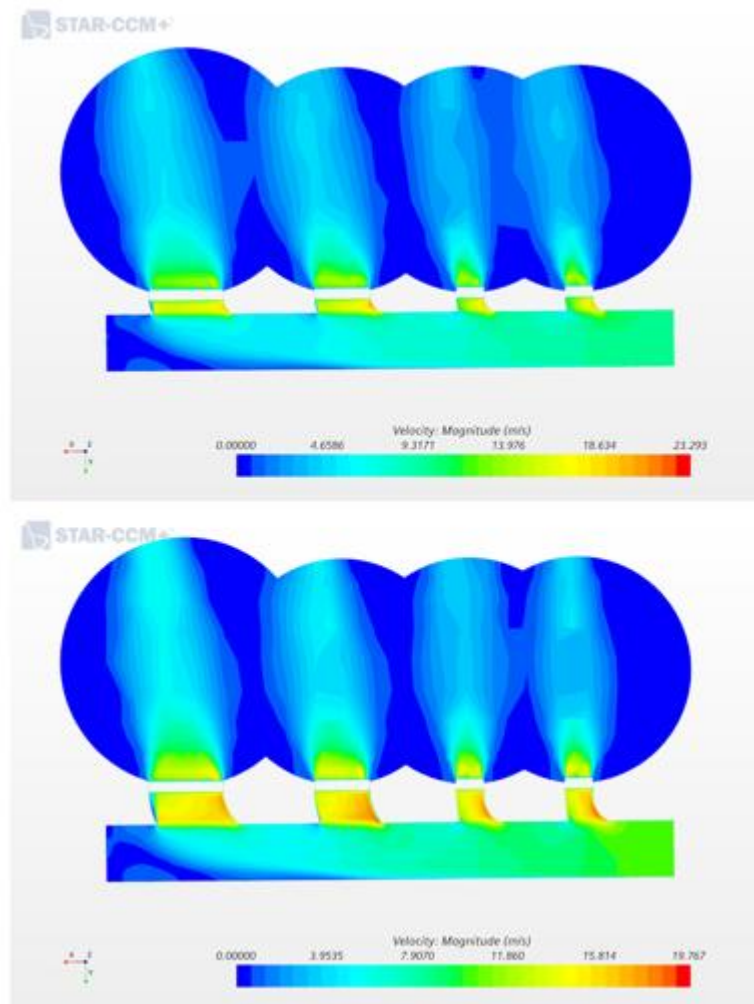
*Ilustración 128: Representación gráfica de un conducto a altura media con operario*

La longitud de los ramales propuestos se estima en 40 cm, por lo que se decide realizar una nueva simulación con tamaño reducido. Se escoge el tamaño de 20 cm para tal tarea, ya que se requiere cierta longitud para absorber el impacto del flujo temprano.

Como puede apreciarse en la Ilustración 129, la comparativa de ambas longitudes demuestra una cierta disparidad en la trayectoria de salida del aire, presentando un ángulo más pronunciado al emplear una longitud menor. Como



consecuencia de ello se obtiene una perpendicularidad inferior, aunque el desvío generado no es excesivo.



*Ilustración 129: Campo de velocidades (longitudes de ramales de 20 y 30 cm de arriba a abajo)*

Se considera a la luz de los resultados obtenidos que para una longitud de ramal de entre 20-40 cm se lograría una salida cercana a la perpendicularidad deseada, aumentando ligeramente el desvío al aproximarse a longitudes de 20 cm. Para longitudes superiores a esta se obtendría una trayectoria similar, suponiendo un gasto adicional en material y fabricación, así como una intensificación de los problemas de espacio que se pretendían evitar.

## 11. Metodología seguida en el desarrollo del trabajo

### 11.1. Descripción de las fases y tareas

Se enumeran y describen brevemente en este apartado las fases y tareas llevadas a cabo a lo largo de la realización del proyecto, junto con sus correspondientes identificadores en el diagrama de Gantt.

#### **F1 Fase inicial**

##### - T1.1 Lectura de la documentación y análisis de los antecedentes

Para dar comienzo al proyecto, esta tarea comprende la adquisición de conocimientos básicos para la realización del mismo. El estudio de diversos conceptos técnicos en relación a la ventilación e instalaciones de desodorización del CABB, así como el análisis de los antecedentes se recogen en esta tarea. En cuanto a los últimos, predomina en este tramo inicial el estudio “*Simulación de flujo de fluidos en proceso de ventilación*” [15].

*Duración: 7 días.*

##### - T1.2 Familiarización con el software

A modo de introducción y con fin formativo, se realizan una serie de tutoriales (reparación de geometría, refinamiento de la malla o simulaciones en procesos de ventilación, entre otros) a la par que se revisa el manual del software a emplear (STAR-CCM+).

*Duración: 10 días.*

##### - T1.3 Especificación de objetivos y requerimientos

La tarea consta de una reunión con los tutores del CABB, Alejandro Fernández Ferrero e Izaskun Astigarraga Sastre, en la que se especifican los principales objetivos y puntos a tratar. Se adjunta documentación adicional por parte de los tutores para la ejecución del proyecto.

*Duración: 1 día.*



- T1.4 Simulaciones preliminares en la EDAR de Galindo

Partiendo del trabajo realizado por David Cuesta en el año académico 2019-2020, se realizan simulaciones en el edificio de recepción de residuos líquidos de la EDAR de Galindo. La finalidad es determinar si el funcionamiento propuesto por dicho estudio es válido o, por el contrario, se perciben desvíos significativos.

*Duración: 6 días.*

**F2 Fase 2**

- T2.1 Comprobaciones de los resultados (reto ESGI con BCAM)

Tras la lectura de la documentación adicional, se intentan replicar los resultados obtenidos por el estudio "Challenge No. 5-Optimal design of ventilation grates through CFD simulations" [2], estudio conjunto con la entidad BCAM dentro de un reto ESGI.

*Duración: 7 días.*

- T2.2 Contrastado de datos y recabado de documentación adicional

Esta tarea engloba las labores de postprocesado de la anterior simulación y la búsqueda de documentación complementaria a fin de verificar las tendencias percibidas.

*Duración: 4 días.*

- T2.3 Simulaciones con diferentes longitudes de rejilla y orientación de la lama

Mediante la utilización de una geometría representativa, esta tarea conforma el estudio de varias alternativas en busca de una salida más perpendicular a través de las rejillas. Para su realización se hace uso del diseño de rejilla proporcionado en la documentación. La tarea en cuestión abarca las labores de reparación y preparación de la geometría, realización de la malla, introducción de los modelos físicos, simulación de los modelos y valoración de los resultados obtenidos.

*Duración: 8 días.*

- T2.4 Preparación de informe 1

Con una duración de 10 días, se recogen los resultados, tendencias y posteriores conclusiones parciales de los casos simulados en un documento escrito. Se comparte dicho documento con los tutores del CABB para comunicar los avances realizados y recibir retroalimentación.

*Duración: 10 días.*

**F3 Fase 3**

- T3.1 Validación de resultados (tubería con extremo abierto)

Se modifican las condiciones de contorno de las anteriores simulaciones con la finalidad de validar los resultados y consolidar las tendencias logradas.

*Duración: 6 días.*

- T3.2 Diseño con paso aumentado y posteriores modificaciones

A la vista de los resultados logrados, se diseña un modelo con paso aumentado y se introducen modificaciones para perfeccionar dicho sistema. Entre las modificaciones introducidas se encuentran los diversos estilos de ramales y su análisis.

*Duración: 10 días.*

- T3.3 Recepción y examinado del prototipo

Se recibe un prototipo de conducto con rejilla semejante al instalado en la actualidad. Se analiza su conexión y fabricación para la comprensión de la viabilidad de varias alternativas.

*Duración: 1 día.*

- T3.4 Simulación con boca acampanada

Tras observar la conexión directa de la rejilla se propone y examina el funcionamiento del sistema con la sustitución de dicha unión por un elemento transicional redondeado, la boca acampanada.

*Duración: 3 días.*



- T3.5 Preparación de informe 2

De manera análoga a la tarea T2.4 se documentan los resultados y conclusiones parciales.

*Duración: 12 días.*

- T3.6 Simulaciones con elementos o superficies directrices

Durante esta tarea se realizan varias pruebas con elementos direccionadores como deflectores o mallas perforadas. Para ello es necesario recabar información adicional sobre el diseño de los mismos y su geometría, así como de profundizar en la modelización de modelos porosos y sus parámetros.

*Duración: 7 días.*

**F4 Fase 4**

- T4.1 Estudio de los aspectos ergonómicos de la solución con ramales

En esta tarea se examinan los aspectos ergonómicos de la solución mencionada: la longitud de los ramales para evitar que sobresalgan en exceso y obstaculicen las labores de los operarios, y la revisión de las velocidades de salida para evitar efectos adversos en zonas con presencia operaria.

*Duración: 7 días.*

**F5 Fase 5**

- T5.1 Redacción del documento

De forma paralela al proyecto se procede a la redacción del documento. La duración de esta tarea se extiende hasta el término del proyecto, ya que en él se incluyen labores de revisión, corrección y redacción del respectivo artículo.

*Duración: 84 días.*

La Tabla 2 reúne los hitos identificados en el transcurso del proyecto:

*Tabla 2: Tabla de hitos*

Identificador	Hito	Fecha
<b>H1</b>	Reunión inicial	02/11/21
<b>H2</b>	Jornada de seguimiento 1	26/01/21
<b>H3</b>	Jornada de seguimiento 2	20/04/21
<b>H4</b>	Jornada de seguimiento 3	25/06/21

## 11.2. Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt tiene como objetivo la representación gráfica de las tareas y fases del desarrollo del proyecto. Cada actividad tiene su correspondiente identificador situado a su izquierda; adicionalmente, las tareas se representan con barras de color azul con longitud proporcional a su duración. Finalmente, a la derecha de los hitos se muestra la fecha de los mismos.

Mencionar que la escala temporal inferior del diagrama (Ilustración 130) se encuentra en semanas para una visualización más clara.

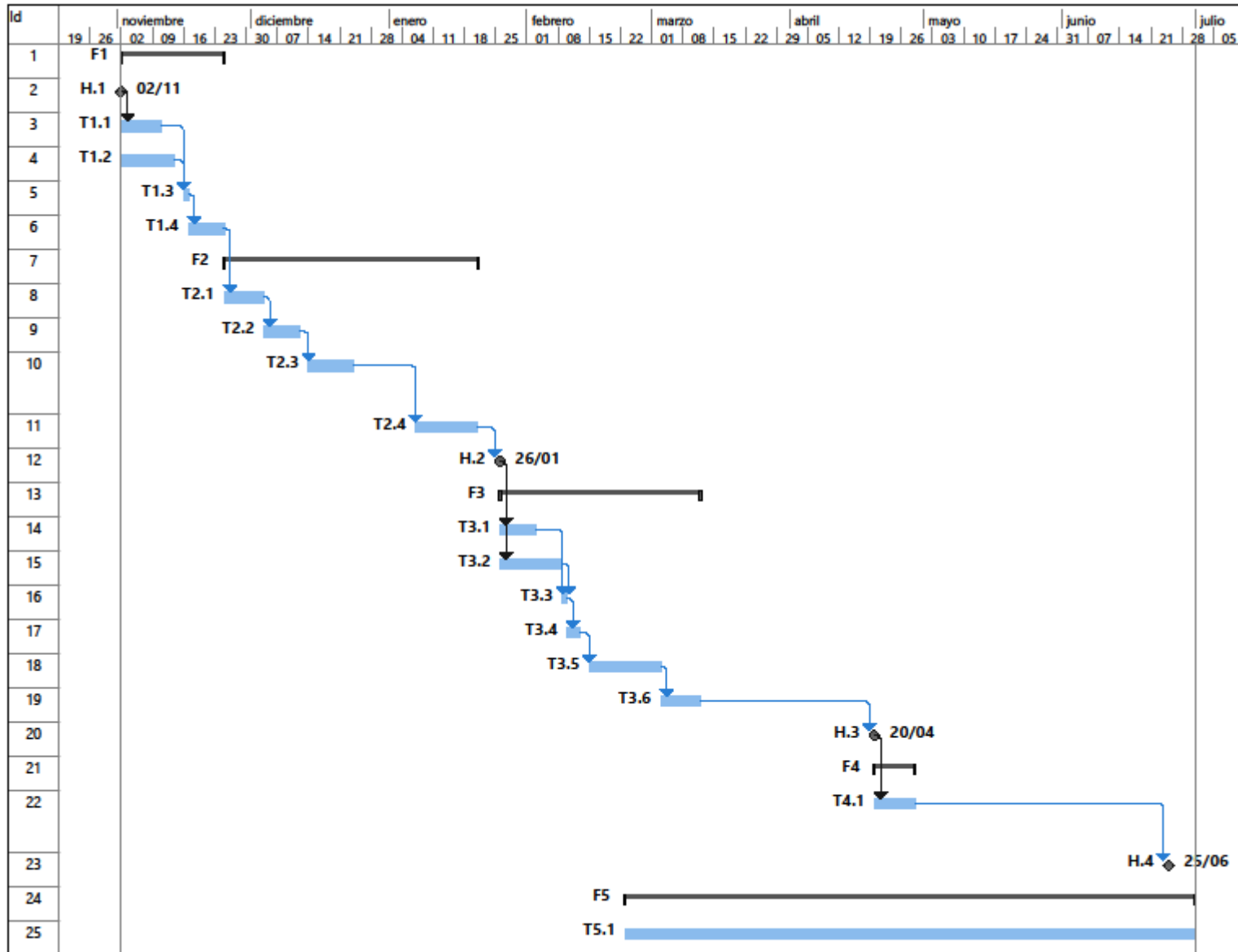


Ilustración 130: Diagrama de Gantt

## 12. Aspectos económicos

Se resumen a continuación los aspectos económicos referentes al proyecto desarrollado, indicando los costes correspondientes a los recursos humanos (Tabla 3), así como aquellos referidos a las amortizaciones (Tabla 4).

Tabla 3: Costes de recursos humanos del proyecto

Cargo	Coste unitario	Tiempo de trabajo	Número de recursos	Coste total
Ingeniero junior	2,5 €/h	630 h	1	1575 €
Directores EIB	25,0 €/h	100 h	2	5000 €
Directores CABB	40,0 €/h	40 h	2	3200 €
<b>Total</b>				<b>9775 €</b>

Tabla 4: Costes de amortización del proyecto

Concepto	Coste [€]	Vida útil	Utilización	Coste total
Equipo informático	800,0	15000 h	550 h	29,33 €
Licencia Microsoft Office	70,0	1 año	8 meses	46,67 €
Licencia software CFD (STAR-CCM+)	300,0	1 año	8 meses	200,00 €
Licencia Microsoft Project	55,0	1 año	1 mes	4,58 €
<b>Total</b>				<b>280,58 €</b>



Teniendo en consideración los costes indirectos, así como el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA), el coste total del proyecto asciende a 13383,98 € (Ver Tabla 5).

*Tabla 5: Presupuesto final del proyecto*

<b>Subtotal 1</b>	10055,58 €
<b>Costes indirectos del 10 %</b>	1005,56 €
<b>Subtotal 2</b>	11061,14 €
<b>IVA del 21 %</b>	2322,84 €
<b>Coste Total</b>	<b>13383,98 €</b>

## 13. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos pueden confirmarse varias tendencias, que se resumen a continuación como las siguientes conclusiones:

- El principal causante del desvío del flujo de aire expulsado a través de las aberturas es el efecto del flujo temprano. Este flujo, denominado así por ser el saliente en primer lugar por la rejilla, contiene un fuerte componente axial que repercute directamente en la direccionalidad del aire que sale posteriormente.
- Esta tendencia causa que el ángulo de salida respecto a la normal de la rejilla sea más pronunciado en las primeras rejillas, por ser el flujo temprano más intenso en estos emplazamientos. Este efecto se disipa visiblemente en la última abertura por el efecto de la sobrepresión al terminar la tubería.
- A mayor longitud de rejilla, mejor se aprecian los efectos adversos de este fenómeno.
- Se concluye que, una configuración de rejilla óptima podría resultar fruto de una combinación adecuada de las tres alternativas con resultados más favorables: el diseño con paso aumentado, la utilización de ramales y el empleo de la boca acampanada.
- El principal artífice de la obtención de la perpendicularidad es el ramal redondeado, el cual absorbe parte del impacto del aire a la entrada y reconduce el desvío.
- La configuración de boca acampanada reduce las pérdidas de carga a la salida.
- El diseño con paso aumentado habilita el equilibrado del conjunto en cuanto a velocidades o presiones para una sección constante.

Cabe destacar que estas conclusiones se han extraído sobre el estudio simplificado del sistema de impulsión. Los resultados podrían variar en función de la geometría del sistema real, por lo que sería conveniente simular el conjunto de elementos reales en una instalación para verificar las tendencias y extraer conclusiones con mayor veracidad.





En último lugar, se ha comprobado la gran utilidad e interés práctico del CFD dentro del paradigma de la ventilación. Un correcto uso de esta herramienta puede llevar a un ahorro energético de los equipos impulsores, a la óptima operatividad del sistema de desodorización en su conjunto y una disminución de las emisiones difusas, convirtiéndola en un instrumento indispensable en aplicaciones de esta índole.

## 14. Líneas futuras de investigación

Se aportan algunas posibles líneas de investigación futuras que pueden enriquecer el trabajo realizado.

Un análisis más exhaustivo y detallado de los modelos estudiados podría dar continuidad al proyecto realizado, por ejemplo, con un refinamiento de la malla. Sin embargo, esto conllevaría un aumento significativo del coste computacional del problema; lo que a su vez da lugar a un requerimiento superior en el área de procesamiento. Para la ejecución de simulaciones con estas particularidades sería de especial utilidad la aplicación de potentes ordenadores dispuestos por las áreas de supercomputación y computación de altas prestaciones (High Performance Computing - HPC).

Por otro lado, acorde con zonas específicas en instalaciones, resulta interesante ahondar en la efectividad de la solución propuesta adaptando la geometría del conducto a una representación más fiel de estas mismas. Esto podría consistir en la reducción del diámetro de los ductos en zonas determinadas de la estancia.

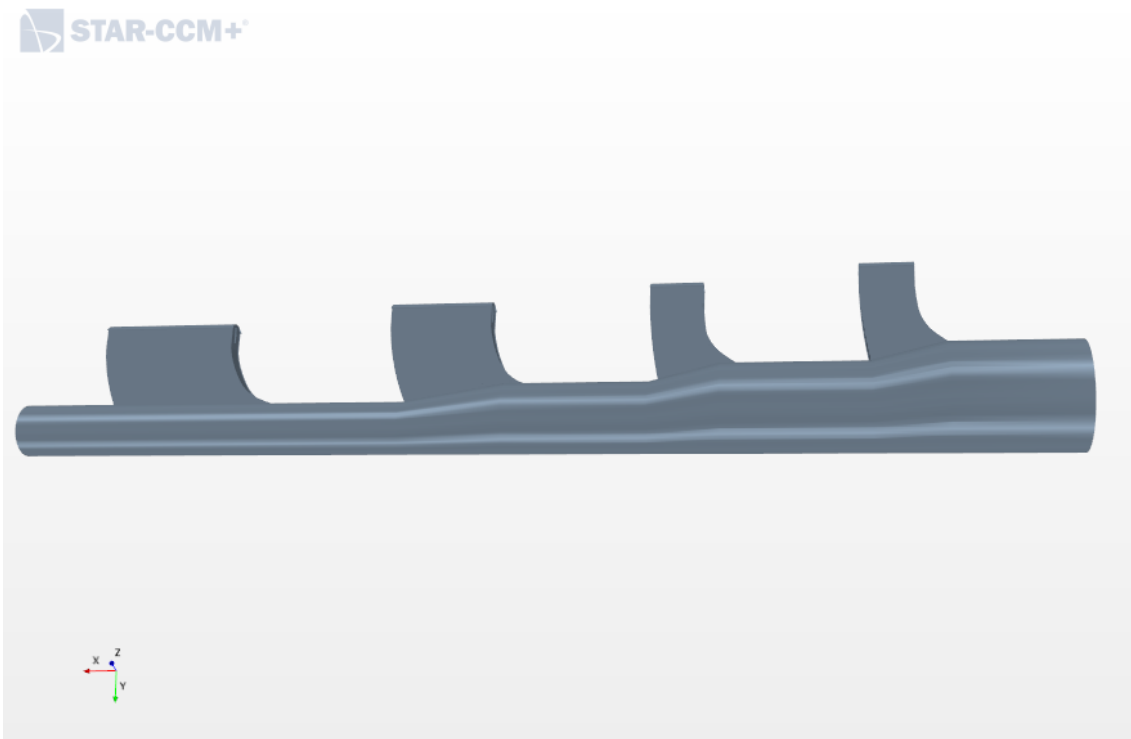


Ilustración 131: Geometría representativa del modelo con ramales y reducción de sección

Tal y como se observa en la Ilustración 131, con un modelo preliminar que contenga reducciones de sección no concéntricas, se acoplan las rejillas mediante ramales redondeados en los tramos de reducción. Este enfoque permite beneficiarse del equilibrado de velocidades para evitar zonas de estancamiento de aire. Es decir, se acelera el flujo interior con la contracción del ducto compensando la deceleración del mismo tras abandonar parte de él la tubería por los ramales. Adicionalmente, se evita la atracción del fluido a las paredes cercanas a las aberturas.

No obstante, la trayectoria descrita por el aire es aún irregular y carece de perpendicularidad en las últimas rejillas por una aceleración excesiva del flujo (Ilustración 132 y 133); razón por la cual el diseño se considera preliminar, pero que podría ser de utilidad a la hora de aplicar en ciertas instalaciones coincidentes con la geometría descrita.

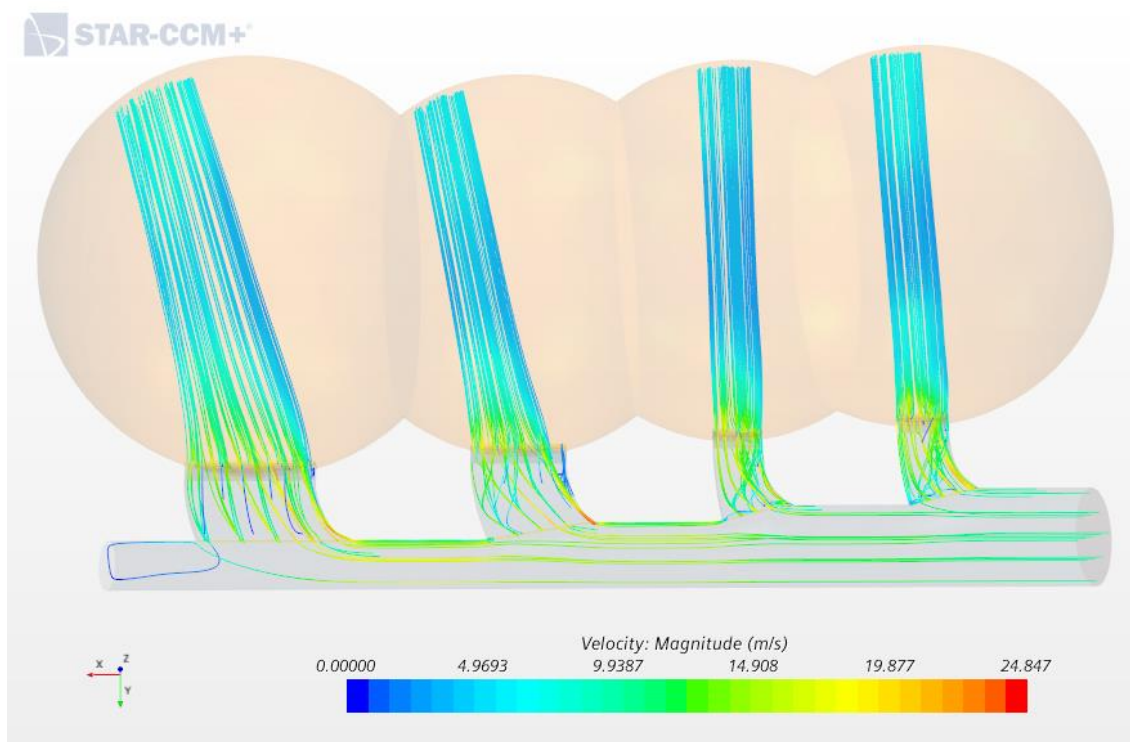
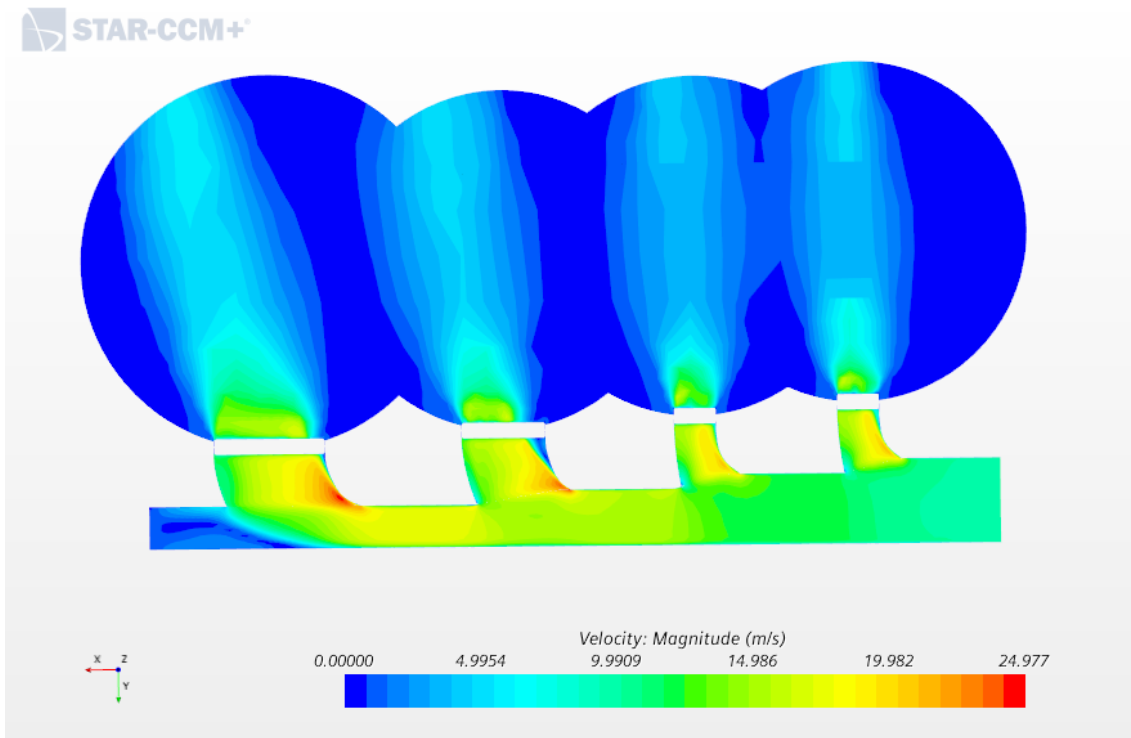


Ilustración 132: Líneas de corriente del modelo con ramales y reducción de sección



*Ilustración 133: Escalar de velocidades del modelo con ramales y reducción de sección*

Otro enfoque de gran provecho, y como se ha mencionado con anterioridad, sería la implementación de las soluciones exitosas llevadas a cabo a lo largo del trabajo en una instalación real. Trasladar dicho sistema a una geometría concreta con sus requerimientos específicos y simularlo en la estancia detallada supone la validación del diseño para su aplicación directa. Ello conllevaría comprobar su funcionalidad y efectividad, a la par que se podrían detectar las imperfecciones o defectos en su explotación y corregirlas con las modificaciones pertinentes. En resumen, este estudio aunaría los beneficios a aportar por ambos estudios, el descrito en este documento y el realizado el curso pasado por David Cuesta [15], pudiendo considerarse una ampliación de los mismos.

Otra línea de continuación podría consistir en la fabricación de un prototipo funcional y el diseño de un sistema de medición para comprobar y validar los resultados y conclusiones extraídas.

Por último, una aplicación interesante radicaría en la integración de instrumentación de medición y monitorización de los datos, para un óptimo control y gestión de los sistemas de desodorización. La medición de parámetros más subjetivos como el olor, sin embargo, requiere de herramientas más



sofisticadas basadas en los mismos principios que los sentidos asociados a la percepción humana del entorno. Se trata de sistemas electrónicos denominados narices electrónicas o e-noses. Estos sistemas replican artificialmente el sentido olfativo biológico mediante un conjunto de sensores electroquímicos específicamente diseñados para detectar olores, que combinado con la aplicación de técnicas de software de inteligencia artificial, consigue el procesamiento de la información y la clasificación de datos en tiempo real [36]. La instalación de estas herramientas en las cercanías de instalaciones de tratamiento de aguas residuales o de estaciones de bombeo, permitiría la detección inmediata de contaminantes u olores desagradables en los puntos designados; posibilitando, no solo una rápida actuación para la correcta eliminación de la molestia olfativa, sino también el empleo de tecnologías de Big Data para realizar previsiones y optimizaciones en el funcionamiento del sistema.

## 15. Bibliografía

- [1] J. L. Recaj and J. Balfagón, "Desodorización Pasiva de espacios confinados en Estaciones Depuradoras De Aguas Residuales," 2017, [Online]. Available: <https://olores.org/es/tecnicas/odour-abatement/698-desodorizacion-pasiva-de-espacios-confinados-en-estaciones-depuradoras-de-aguas-residuales>.
- [2] M. Alonso-Reig, M. Echeverria-Ferrero, A. Donado-Urquizu, I. Garcia-Beristain, and V. Nava, "Challenge No. 5-Optimal design of ventilation grates through CFD simulations." 2019.
- [3] CABB, "Quienes Somos. Entidades que lo integran." <https://www.consorciodeaguas.eus/Web/QuienesSomos/Entidades.aspx>.
- [4] CABB, "Quienes Somos. Reseña Histórica." [https://www.consorciodeaguas.eus/Web/QuienesSomos/resena\\_historica.aspx](https://www.consorciodeaguas.eus/Web/QuienesSomos/resena_historica.aspx).
- [5] CABB, "Quienes Somos. Competencias." <https://www.consorciodeaguas.eus/Web/QuienesSomos/competencias.aspx>.
- [6] J. L. I. Gandarillas, "Desodorización. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización." 2016, [Online]. Available: <https://www.eoi.es>.
- [7] CABB, "El CABB invertirá 7,8 mill. de euros en un proyecto piloto para reducir el impacto visual y por olor del tratamiento biológico de la EDAR de Galindo." 2019, [Online]. Available: [https://www.consorciodeaguas.eus/Web/OficinaPrensa/noticias\\_detalle.aspx?id=397](https://www.consorciodeaguas.eus/Web/OficinaPrensa/noticias_detalle.aspx?id=397).
- [8] A. L. Etxebarria, "Convivencia entre una depuradora y su entorno urbano. Rediseñando la EDAR de Galindo," [Online]. Available: [www.olores.org](http://www.olores.org).
- [9] A. A. Asier López, J. M. Juárez-Galan, Rubén Cerdá, "Industria y Sociedad. Adaptación de la actividad industrial a las nuevas demandas sociales," 2014, [Online]. Available: [https://olores.org/ndex.php?option=com\\_content&view=article&id=412:industry-and-society-adaptation-of-the-industrial-activity-to-the-new-demands-of-society-wwtp-galindo&catid=80&Itemid=422&lang=es](https://olores.org/ndex.php?option=com_content&view=article&id=412:industry-and-society-adaptation-of-the-industrial-activity-to-the-new-demands-of-society-wwtp-galindo&catid=80&Itemid=422&lang=es).



- [10] Universidad Politécnica de Madrid de Física, "Instalaciones de ventilación." [Online]. Available: <http://www.aq.upm.es/Departamentos/Fisica/UD-instalaciones/Doc02.pdf>.
- [11] Aire Limpio Global, "Tipos de ventiladores. Clasificación." <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/#:~:text=Hay tres tipos básicos de,que requieren una clasificación separada.>
- [12] DecorexPro, "Variedades y características del uso de difusores de ventilación." <https://es.decorexpro.com/ventilyaciya/difuzory/>.
- [13] Airflow, "Manual de Difusión de Aire." [Online]. Available: [http://www.airflow.es/media/manual\\_difusion.pdf](http://www.airflow.es/media/manual_difusion.pdf).
- [14] ArchiEXPO, "Tobera de largo alcance (fabricante Tangra)." <https://www.archiexpo.es/prod/tangra/product-130803-1580949.html>.
- [15] D. Cuesta Herrero, "Simulación de flujo de fluidos en proceso de ventilación," *Libro de Resúmenes de los Trabajos de Fin de Máster realizados en el Aula del Agua "CABB" durante el curso 2019/2020*, pp. 87–100, 2020.
- [16] H. Fang, K. Li, G. Wu, R. Cheng, Y. Zhang, and Q. Yang, "A CFD analysis on improving lettuce canopy airflow distribution in a plant factory considering the crop resistance and LEDs heat dissipation," *Biosyst. Eng.*, vol. 200, pp. 1–12, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.017.
- [17] M. E. Raffino, "Aire," *Concepto de*, 2020, [Online]. Available: <https://concepto.de/aire/#ixzz6m3UXtlkH>.
- [18] C. Mendez, "Fluidos. Densidad," *FISICA. 4 Periodo*. <https://www.monografias.com/trabajos15/mecanica-fluidos/mecanica-fluidos.shtml>.
- [19] J. M. Blanco, G. A. Esteban, G. Ibarra, K. Olondo, and A. Peña, *Mecánica de fluidos (notas de clase)*. Bilbao, España: Departamento de Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos (UPV/EHU), 2011.
- [20] Revista Cero Grados, "Guía básica de ventilación," 2020, [Online]. Available: <https://0grados.com.mx/guia-basica-de-ventilacion/>.
- [21] J. E. Meléndez Rangel, "Mecánica de Fluidos. Flujo compresible y flujo incompresible." [Online]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos15/mecanica-fluidos/mecanica-fluidos.shtml>.

- [22] LABAQUA S.A., "Evaluación y Optimización Mediante Técnicas de CFD de la Ventilación en el Recinto Dedicado a Recepción de Residuos Líquidos de la EDAR de Galindo," Alicante, 2016.
- [23] Equipe ESSS, "Dinámica de Fluidos Computacional: ¿qué es?," *Blog ESSS*, 2016. <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/#:~:text=La Dinámica de Fluidos Computacional,químicas%2C combustión%2C aeroacústica etc>.
- [24] R. Fernández Feria and J. Ortega Casanova, "Mecanica de Fluidos, Universidad de Málaga," 2014, [Online]. Available: [http://www.fluidmal.uma.es/NCMF/Notas de clase\\_2014.pdf](http://www.fluidmal.uma.es/NCMF/Notas de clase_2014.pdf).
- [25] F. Carro Cepeda and F. A. Hernández González, "Fluidodinámica Computacional aplicada a vehículos: Estudio de la influencia de las ruedas y los pasos de rueda en la aerodinámica de un automóvil," 2006, Accessed: May 27, 2021. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/2952>.
- [26] A. Peña, "Mecánica de Fluidos Computacional. Prácticas," Bilbao, España.
- [27] C. D. Moreno Rodríguez, "Simulación numérica de flujos convectivos a altos números de Rayleigh en sistemas pasivos de climatización," Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (Universidad Politécnica de Cartagena), 2008.
- [28] S. M. Salim, "Computational study of wind flow and pollutant dispersion near tree canopies," 2011.
- [29] J. Hart, "Comparison of Turbulence Modeling Approaches to the Simulation of a Dimpled Sphere," *Procedia Eng.*, vol. 147, pp. 68–73, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.191.
- [30] J. Sánchez Vázquez, "Simulación Numérica Directa en Paralelo de las Ecuaciones de Navier-Stokes en Flujos con Capa Límite Desprendida. Aplicaciones en Instalaciones Deportivas con Gradass Cubiertas," Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2004.
- [31] S. L. Sánchez, "Estudio y simulación del conducto de ventilación y de la temperatura del interior de un autobús mediante OpenFOAM," Dec. 2017. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/49271/>.
- [32] D. Cisneros González, "Estudio experimental y numérico de la separación del flujo turbulento alrededor de un perfil aerodinámico," Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad TICOMÁN, 2011.





- [33] W. Reed *et al.*, "Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing RI 9689 REPORT OF INVESTIGATIONS/2012 Chapter 3: Drilling and Blasting," 2012, pp. 70–108.
- [34] M. D. Jhonson, "Turning Vanes: Necessary Component, or Efficiency Reduction Device?," *Build. Eng. (Mullinax Solut. Inc.)*, 2009, [Online]. Available: <https://buildingengineer.wordpress.com/2009/12/11/turning-vanes-necessary-component-or-efficiency-reduction-device/>.
- [35] GEBHARDT-STHAL GMBH, "Turning Vane / Mounting Track (HVAC Components)." <https://www.gebhardt-stahl.de/en/hvac-components/turning-vane-mounting-track/>.
- [36] J. Á. Fernández Muñoz, J. Lozano Rogado, J. I. Suárez Marcelo, J. L. Herrero Agustín, and J. P. Santos Blanco, "Un Sistema de Clasificación de Olores en Línea para Narices Electrónicas," *DYNA Ing. E Ind.*, vol. 92, no. 1, pp. 354–360, 2017, doi: 10.6036/8075.