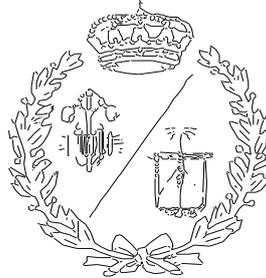


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO  
AERODINÁMICO DE UN AUTOBÚS EN  
CONDICIONES DE VIENTO FRONTAL.**

**Analysis of the aerodynamic behavior of a  
coach in front wind conditions.**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Autor: David López Pérez**

**Junio - 2017**



## ***AGRADECIMIENTOS***

---

A mi familia, en especial, a mis padres, por todos los esfuerzos que han hecho para que haya podido llegar hasta aquí.

El agradecimiento más sincero posible a mis tutores, Agustín Santisteban y Juan Carcedo.



---

## ***Índice general***

---

RESUMEN.....	9
1 INTRODUCCIÓN .....	10
1.1 OBJETIVOS .....	10
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	10
1.3 ANTECEDENTES.....	10
1.4 ALCANCE.....	11
2 ESTADO DEL ARTE .....	12
3 ACERCAMIENTO TEÓRICO .....	15
3.1 INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS.....	15
3.1.1 Clasificación de los flujos de fluidos.....	15
3.1.2 Condición de no deslizamiento y capa límite .....	18
3.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	20
3.2.1 Densidad .....	20
3.2.2 Viscosidad .....	21
3.3 CINEMÁTICA DE FLUIDOS .....	22
3.3.1 Descripción Lagrangiana y Euleriana.....	22
3.3.2 Teorema del transporte de Reynolds .....	24
3.3.3 Fundamentos de visualización del flujo.....	25
3.3.4 Gráficas sobre flujos de fluidos .....	27
3.3.5 Vorticidad y rotacionalidad .....	29
3.4 ECUACIÓN DE BERNOULLI .....	30
3.4.1 Presión estática, dinámica y de estancamiento.....	31
3.4.2 Limitaciones en la aplicación de Bernoulli.....	32
3.5 ANÁLISIS DIFERENCIAL DEL FLUJO DE FLUIDOS .....	33
3.5.1 Ecuación de la continuidad .....	33
3.5.2 Ecuación de Navier-Stokes.....	34
3.6 CÁLCULO CON CFD DE FLUJO TURBULENTO.....	36
3.6.1 Modelo de turbulencia Realizable k- $\epsilon$ .....	40
3.7 ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELADO.....	41
3.7.1 Análisis dimensional y similitud.....	41
3.7.2 Pruebas experimentales y similitud incompleta.....	42
3.8 AERODINÁMICA .....	45
3.8.1 Arrastre y sustentación .....	45

---

---

3.8.2	Arrastre debido a fricción y a presión.....	48
4	METODOLOGÍA.....	51
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	62
5.1	ESTUDIO AERODINÁMICO GENÉRICO DE LOS MODELOS.....	62
5.2	ESTUDIO AERODINÁMICO DEL MODELO SIMPLIFICADO .....	68
6	CONCLUSIONES.....	79
7	BIBLIOGRAFÍA .....	81
7.1	LIBROS, TRABAJOS Y OTROS DOCUMENTOS .....	81
7.2	REVISTAS.....	82
7.3	PROGRAMAS DE ORDENADOR.....	82
7.4	SITIOS WEB.....	82
	ANEXOS.....	83

## **Figuras**

Figura 1. Kässbhorer aerodinámico de 1935.....	13
Figura 2. Mercedes Benz LO 3500 personalizado.....	13
Figura 3. Castrosua Ludewing Aero.....	13
Figura 4. Setra Serie 500.....	14
Figura 5. Zona viscosa y no viscosa en una región de fluido.....	16
Figura 6. Desarrollo de la capa límite para flujo sobre placa plana.....	18
Figura 7. Separación de flujo.....	19
Figura 8. Gráfica del perfil velocidad.....	27
Figura 9. Gráfica del perfil velocidad convertida en gráfica vectorial velocidad.....	27
Figura 10. Gráfica vectorial genérica.....	28
Figura 11. Gráfica de contorno y de contorno relleno genérica.....	29
Figura 12. Rotacionalidad e irrotacionalidad del flujo de fluido.....	30
Figura 13. Zona de capa límite y estelas.....	31
Figura 14. Turbulencias que resuelve la técnica DNS.....	36
Figura 15. Turbulencia que resuelve la técnica LES.....	37
Figura 16. Componentes de la velocidad instantánea en zona turbulencia.....	38
Figura 17. Representación de la banda móvil para lograr semejanza cinemática.....	43
Figura 18. Independencia de $C_D$ para Reynolds altos.....	45
Figura 19. Esquema con el centro de presiones del autobús.....	46
Figura 20. Esquema de fuerzas y momentos en el centro de gravedad del autobús.....	47
Figura 21. Esquema bidimensional de distribución de presión normal y cortante.....	48
Figura 22. Componentes de arrastre.....	50
Figura 23. Vista general del modelo diseñado en AUTODESK INVENTOR.....	51
Figura 24. Vista lateral del autobús.....	51
Figura 25. Vista general trasera del autobús.....	52
Figura 26. Vista general del modelo 2.....	52
Figura 27. Vista general del modelo 3.....	53
Figura 28. Vista general del modelo 4.....	53
Figura 29. Dominio computacional del modelo 1.....	54
Figura 30. Corte en mitad de la malla.....	55
Figura 31. Detalle del corte en la malla.....	56
Figura 32. Detalle 2 del corte en la malla.....	56
Figura 33. Corte simétrico; selección de las caras y superficies interiores.....	57

---

Figura 34. Dominio computacional en donde vemos las condiciones de contorno. ....	58
Figura 35. Residuos de las iteraciones de las ecuaciones principales. ....	59
Figura 36. Coeficiente de arrastre para cada iteración. ....	60
Figura 37. Coeficiente de sustentación para cada iteración. ....	60
Figura 38. Vista general con el centro de gravedad y centro aerodinámico.....	61
Figura 39. Líneas de corriente en plano YZ del modelo 1. ....	64
Figura 40. Líneas de corriente en plano YZ del modelo 2. ....	64
Figura 41. Separación de flujo en la trasera del cajetín del aire acondicionado. ....	65
Figura 42. Líneas de corriente en plano YZ del modelo 2. ....	65
Figura 43. Gráfica de contorno en plano YZ del modelo 2. ....	66
Figura 44. Líneas de corriente en plano paralelo al YZ. ....	66
Figura 45. Líneas de corriente en plano paralelo al YZ. ....	67
Figura 46. Detalle de rueda delantera en modelo 1.....	67
Figura 47. Detalle de rueda trasera en modelo 1. ....	67
Figura 48. Gráfica de contorno.....	69
Figura 49. Gráfica de contorno en plano ZY.....	70
Figura 50. Regresión cuadrática por mínimos cuadrados. ....	71
Figura 51. Curva de regresión cuadrática y parábola aerodinámica.....	72
Figura 52. Variación del arrastre en cada parte en función de la velocidad.....	74
Figura 53. Corte por el plano de simetría YZ.....	75
Figura 54. Regresión cuadrática por mínimos cuadrados del $M_x$ frente a velocidad. .	76
Figura 55. Parábola de sustentación para la condición de cabeceo nulo. ....	77

## ***Tablas***

---

Tabla 1. Descripción abreviada de los modelos de turbulencia más elementales. ....	39
Tabla 2. Tabla de resultado del primer análisis. ....	62
Tabla 3. Fuerzas aerodinámicas para velocidades de entrada.....	69
Tabla 4. Fuerza de sustentación debida a presión en las partes del modelo 2.....	70
Tabla 5. Fuerza de arrastre para cada parte del autobús.....	73
Tabla 6. Tabla de centro de presión.....	74
Tabla 7. Momento de cabeceo en función de la velocidad de entrada .....	76

## RESUMEN

En primer lugar, hemos creado un modelo de autobús para estudiar su comportamiento aerodinámico, es decir, los esfuerzos aerodinámicos que se producen y zonas de turbulencia y recirculación, y partir de este modelo, hemos creado otros tres modelos con un diseño más simplificado siguiendo un orden de menor a mayor simplicidad en cuanto a elementos que los forman y a la geometría diseñada en los mismos. En segundo lugar, les hemos aplicado a los cuatro el método de los volúmenes finitos con CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), para ello, hemos asignado un dominio computacional y un mallado a cada modelo, seguido de una asignación de material fluido (aire) al dominio computacional, después hemos aplicado condiciones de contorno a la superficie de la carrocería del autobús y a los elementos que lo constituyen tales como ruedas, espejos y otros, y también aplicamos estas condiciones de contorno al entorno computacional, como a la entrada del dominio, a su salida, a la carretera...A continuación, entrarán en juego las ecuaciones de conservación y de transporte, para resolver el flujo de fluido que envuelve a nuestros autobuses y sacar información de cada caso, lo que llamaremos información de post-procesado. En tercer lugar, someteremos a los cuatro modelos a examen y valoraremos sus comportamientos aerodinámicos en base a resultados numéricos e información gráfica de post-procesado, donde concluiremos, que la primera simplificación es apta para seguir con el estudio y el análisis, puesto que a efectos prácticos puede sustituir al modelo base. En cuarto lugar, someteremos a diferentes condiciones de viento frontal a este modelo simplificado, al que nos referiremos como modelo 2, y calcularemos los diferentes esfuerzos producidos que serán fuerzas aerodinámicas y momentos aerodinámicos, como el momento de cabeceo a partir de la determinación del centro aerodinámico y de la estimación del centro de gravedad, que se producen en él debido a tales condiciones de viento, e incluso, veremos cómo cada parte del mismo se siente afectada por los efectos aerodinámicos más importantes, como el de arrastre, lo cual no quiere decir, que sean las responsables de que se produzcan. Paralelamente al paso de los puntos anteriores, hemos ido aportando sustento teórico donde damos los fundamentos físicos que rigen el comportamiento del problema y explicamos desde el punto de vista teórico la imposibilidad de resolverlo con otros métodos que se podrían emplear para afrontar el problema, como el análisis dimensional.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 OBJETIVOS

Se pretende estudiar el comportamiento aerodinámico general de un modelo de autobús creado, apoyándonos en distintas simplificaciones del mismo y evaluando los impactos aerodinámicos que suponen estas simplificaciones. Asimismo, se pretende calcular los esfuerzos aerodinámicos más elementales que se producen en el vehículo e identificar las zonas de turbulencia o recirculación más importantes para diferentes condiciones de viento frontal. No se pretende estudiar las causas de los distintos efectos aerodinámicos que se producen en las distintas partes de la carrocería del autobús, sino cuantificar la importancia de las partes en las que se producen estos efectos, ya que repercutirán al comportamiento general. Por otro lado, también es objetivo, aprender a utilizar programas de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para adquirir una mejor formación intelectual y conceptual. No está entre los objetivos de este trabajo, entrar en la matemática computacional de los algoritmos informáticos ni en la discretización matemática de las ecuaciones diferenciales.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Muchas de las carreteras actuales como autopistas y autovías atraviesan zonas de gran altitud y poco resguardadas del viento debido a la orografía del terreno, en comparación, con muchas de las carreteras antiguas que gozaban de una mayor protección en cuanto al viento. Este es uno de los alicientes que ha propiciado el desarrollo de este trabajo ya que mediante el análisis aerodinámico podemos detectar zonas de pérdidas debidas a turbulencias o zonas de recirculación que produce el viento, y, en consecuencia, hacer que no se produzcan o que se produzcan con menor intensidad, consiguiendo así, un transporte más eficiente, es decir, que requiera de un menor consumo de combustible y se emitan menos emisiones al medio ambiente.

## 1.3 ANTECEDENTES

La aerodinámica en vehículos pesados como autobuses y camiones es un campo en todavía etapa de desarrollo, y, además, no tenemos acceso a los antecedentes existentes directamente vinculados con nuestro trabajo. Pero de manera más indirecta tenemos algunos estudios como el de (Lanas Pérez, 2007) y el de (Brunel Vázquez, 2009) nos han aportado una pequeña inspiración para realizar este estudio, y también, estudios como el de (Bartrons i Casademont, 2014) nos ha servido para aportar un punto de partida en algún apartado de nuestro trabajo.

## 1.4 ALCANCE

En este trabajo, no se pretende desarrollar un diseño aerodinámico que cumpla una serie de requerimientos aerodinámicos sino hacer un análisis del comportamiento aerodinámico a partir del diseño de un modelo de autobús y de sus correspondientes modelos simplificados. No se va a estudiar el comportamiento con viento lateral o transversal sino puramente con condiciones frontales. Nuestro alcance viene limitado por varios factores. La malla es el más importante, hemos hecho una malla dentro de nuestras posibilidades, pues hacer una malla de alta calidad y estudiar su impacto en el estudio requeriría de mucho tiempo, y no disponemos de este en exceso; la potencia y el tiempo computacional requeridos para resolver el estudio también son factores que han acotado nuestro alcance; y los valores utilizados en el modelo de turbulencia de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) no nos otorgarán una máxima precisión en los resultados aunque si serán aceptables.

## 2 ESTADO DEL ARTE

La aerodinámica es la parte de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento entre un cuerpo sólido y un fluido cuando existe movimiento relativo entre ambos.

El diseño de la carrocería de un vehículo tiene una importancia decisiva en la calidad de su aerodinámica, cuestiones tales como las prestaciones, la estabilidad, la adherencia al suelo y el consumo de combustible dependen directamente de las formas de la carrocería y de su aerodinámica. En vehículos pesados como autobuses la mejora aerodinámica supone entre otras cosas, la reducción del consumo de combustible (puede llegar a disminuir hasta en un 10%), reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otras sustancias perjudiciales para el medio ambiente, reducción en los costes de mantenimiento, menores requerimientos de potencia en la motorización, disminución de ruido y vibraciones, reducción de salpicaderos y mejoras dinámicas del vehículo frente al viento lateral. (De Miguel, 2015)

Los fabricantes de automóviles incluidos los de autobuses intentan cada vez más diseñar y fabricar los vehículos con una resistencia aerodinámica cada vez menor que se traduce en una reducción de los coeficientes de arrastre. La forma ideal de un vehículo es básicamente la de una gota, con un coeficiente de arrastre de aproximadamente 0.1 para el caso de flujo turbulento. Pero, esta forma necesita modificarse para acomodar varios componentes externos necesarios, como ruedas, espejos, ejes, rejillas, puertas... Además, los vehículos especialmente los autobuses deben ser lo suficientemente altos por comodidad. El control del material y los costes de fabricación exigen minimizar o eliminar cualquier volumen "muerto" que no se pueda utilizar. El resultado es una forma que recuerda más a una caja que a una gota, y ésta fue la forma de los primeros automóviles con un coeficiente de arrastre de alrededor de 0.8 en los años veinte. Esto no era un problema en aquellos tiempos porque las velocidades eran bajas y el arrastre no se consideraba parte del diseño principal. Los coeficientes de arrastre promedio de los automóviles cayeron a casi 0.70 en los años cuarenta, a 0.55 en la década de los setenta, a 0.45 en los años ochenta y a 0.30 en los noventa, como resultado de técnicas de fabricación mejoradas para la construcción de chapas metálicas y poner mayor atención a la forma del automóvil y la aerodinámica. Para autobuses y camiones, el coeficiente de arrastre puede reducirse todavía más cuando se optimizan los contornos frontal y posterior (mediante redondeo, por ejemplo) en la medida en que sea práctico mientras se mantiene igual la longitud global del vehículo. (Çengel, 2012)

Uno de los primeros autocares aerodinámicos (ver la Figura 1) nace en los años treinta, con la llegada de las primeras autovías en Alemania, que generaron la necesidad de contar con vehículos que fueran capaces de alcanzar las altas velocidades que permitían estas vías. Para lograr estas velocidades con las bajas potencias de los motores de la época tenían que afinar en la ligereza del autobús y en las características aerodinámicas. (Setra, 2017)

---



Figura 1. Kässbhorer aerodinámico de 1935. (Setra, 2017)

Seguidamente, otras firmas de la época comenzaron a lanzar prototipos también aerodinámicos (ver Figura 2 y Figura 3).



Figura 2. Mercedes Benz LO 3500 personalizado. (Mulpix, 2017)

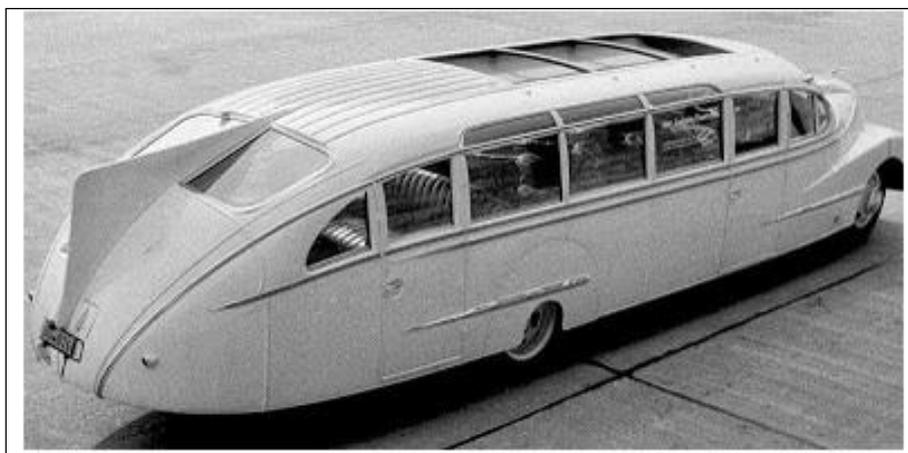


Figura 3. Castrosua Ludewing Aero. (Castrosua, 2015)

El aumento de la velocidad de circulación que ha sido posible gracias a las mejoras de las carreteras y a la construcción de nuevas autopistas y autovías ha hecho que los fabricantes de autobuses tengan que mejorar la aerodinámica de sus diseños. En algunos casos, como sucede en la autovía de la meseta (meseta cantábrica) perteneciente a nuestra comarca, hay algunos tramos donde la velocidad del viento puede ser considerablemente alta y la única solución para paliar los diferentes efectos que produce el viento en los autobuses a su paso, pasa por hacer diseños aerodinámicos en los mismos. En base a esta línea, ha sido diseñado el autobús que se plasma en la siguiente figura.



Figura 4. Setra Serie 500, cuyo coeficiente de arrastre es de  $C_D=0.33$ . (Setra Family, 2012)

Las claves de la excelente aerodinámica de la serie ComfortClass 500 son el frontal redondeado, laterales lisos, zaga aerodinámica con alerón, retrovisores exteriores optimizados y limpiaparabrisas de hoja plana entre otros aspectos. A esta disminución de la resistencia al aire contribuye además otra audaz idea, también exclusiva en el sector: a partir de una velocidad de 95 km/h el autocar desciende 20 mm su altura. Consiguiendo entre otras cosas una reducción en el consumo de combustible y una menor cantidad de emisiones al medio ambiente. (Setra Family, 2012)

### **3 ACERCAMIENTO TEÓRICO**

La mecánica de fluidos nos ofrece tres maneras de abordar el problema. La primera es considerando un volumen de control lo suficientemente grande para que englobe al autobús y al flujo de fluido que le rodea con un amplio margen de espacio, tanto como la zona del mismo que se sentirá afectada o interferida por la presencia del autobús. Este no sería relativamente complejo de resolver, pero equivaldría a resolverlo como si fuese una caja negra, es decir, no sabríamos lo que pasa dentro de este volumen de control, por lo que dejaríamos de ver zonas de recirculación, vórtices, capa límite... De manera que este método queda ya descartado; la segunda, que es la que vamos a aplicar, es el cálculo diferencial apoyándonos en CFD, que, a grandes rasgos, consiste en cambiar el volumen de control anterior por volúmenes de control más pequeños cuya suma de ellos siga ocupando el volumen de control del principio. A cada volumen de control finito le aplicaremos las ecuaciones del cálculo diferencial; y la última manera e inviable para nosotros es mediante análisis dimensional (apartado 3.7) la que también incluye el hacerlo con un autobús tamaño real con la forma de nuestro diseño, del que obviamente no disponemos.

#### **3.1 INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS**

La disciplina de la ingeniería sobre la que versa este trabajo es la mecánica de fluidos que la definimos como la ciencia que trata del comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de la interacción de estos con sólidos u otros fluidos, en las fronteras. Existe una amplia variedad de problemas del flujo de fluidos que se encuentran en la práctica y suele ser conveniente clasificarlos sobre la base de algunas características comunes, para que sea factible estudiarlos. Existen muchas maneras de clasificar los problemas del flujo de fluidos y seguidamente vamos a mostrar algunas que nos irán bien en relación al flujo utilizado en este trabajo.

##### **3.1.1 Clasificación de los flujos de fluidos**

Las clasificaciones que hacemos a continuación están directamente vinculadas con el desarrollo del ejercicio que resolvemos en este trabajo siendo fundamento teórico del mismo, es decir, no solo son clasificaciones que atienden a la mecánica de fluidos en general, sino que están relacionadas con lo que se desarrolla en el trabajo.

### **Regiones viscosas de flujo en comparación con las no-viscosas**

Cuando dos capas de fluido se mueven una respecto a otra, se desarrolla una fuerza de fricción entre ellas y la capa más lenta trata de desacelerar a la más rápida. Esta resistencia interna al flujo se cuantifica mediante la propiedad de viscosidad del fluido, la cual es una medida de la adherencia interna de éste. La viscosidad es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, en los líquidos, y en los gases, por las colisiones moleculares. No existe fluido con viscosidad cero y, en consecuencia, en todos los flujos de fluidos intervienen los efectos viscosos en cierto grado. Los flujos en donde los efectos de la fricción son significativos se llaman flujos viscosos. Pero, en muchos flujos de interés práctico, se tienen regiones (por lo general regiones que no están cercanas a superficies sólidas) en donde las fuerzas viscosas son despreciablemente pequeñas en comparación con las fuerzas de inercia o de presión. Despreciar la viscosidad en esas regiones no-viscosas de flujo simplifica mucho el análisis, sin pérdida considerable en la exactitud.

En la Figura 5, se muestra el desarrollo de las regiones viscosas y no-viscosas de flujo como resultado de la inserción de una placa plana paralela al flujo en una corriente de fluido de velocidad uniforme. El fluido se pega a la placa en ambos lados debido a la condición de no-deslizamiento y la delgada capa límite en la cual los efectos viscosos son significativos, cercana a la superficie de la placa es la región de flujo viscoso. La región de flujo en ambos lados, lejana a la placa y que no es afectada por ésta es la región de flujo no-viscoso. (Çengel, 2012)

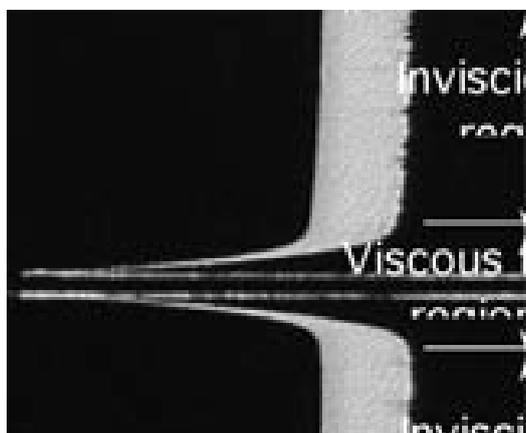


Figura 5. Zona viscosa y no viscosa en una región de fluido. (Çengel, 2012)

### **Flujo externo en comparación con el flujo interno**

El flujo de fluido que nosotros vamos a tratar es un flujo externo ya que no está limitado por una superficie y el fluido albergará o envolverá a nuestro autobús. Por el contrario, si el flujo circula a través en un tubo o un ducto hablaríamos de flujo interno ya que el flujo quedaría por completo limitado por superficies sólidas. Los flujos internos están dominados por la influencia de la viscosidad en todo el campo de flujo. En los flujos externos, los efectos

viscosos quedan limitados a la capa límite cercana a las superficies sólidas y a las regiones de la estela corriente abajo de los cuerpos; de estos conceptos hablaremos con detalle más adelante.

### **Flujo incompresible en comparación con el compresible**

Un flujo se clasifica como compresible o incompresible, dependiendo del nivel de variación de la densidad del fluido durante ese flujo. La incompresibilidad es una aproximación y se dice que el flujo es incompresible si la densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo. Por lo tanto, el volumen de todas las porciones del fluido permanece inalterado sobre el curso de su movimiento cuando el flujo es incompresible. Una manera de predecir el tipo de flujo al que nos enfrentamos es mediante el número adimensional de Mach que se define como:

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{\text{Velocidad del flujo}}{\text{Velocidad del sonido}} \quad (1)$$

En donde  $c$  es la velocidad del sonido cuyo valor es de 346 m/s en el aire a temperatura ambiente al nivel del mar. Se dice que un flujo es sónico cuando  $Ma = 1$ , subsónico cuando  $Ma < 1$ , supersónico cuando  $Ma > 1$ , e hipersónico cuando  $Ma \gg 1$ . Con frecuencia, los flujos de gases se pueden aproximar como incompresibles si los cambios en la densidad se encuentran por debajo del 5 por ciento, lo cual suele ser el caso cuando  $Ma < 0.3$ . Por lo tanto, los efectos de la compresibilidad del aire se pueden despreciar a velocidad por debajo de alrededor de 100 m/s. (Çengel, 2012)

### **Flujo laminar en comparación con el turbulento**

Algunos flujos son suaves y ordenados en tanto que otros son considerados caóticos. El movimiento ordenado de un fluido, caracterizado por capas no-alteradas lo conocemos como laminar, pero si el movimiento de un fluido es desordenado, que es común que se presente a velocidades altas y se caracterice por fluctuaciones en la velocidad se llama turbulento. Además, un flujo que se alterna entre laminar y turbulento se conoce como de transición. El flujo de fluidos de baja viscosidad, como el aire a velocidades altas es por lo común turbulento. Un parámetro clave para la determinación del régimen de flujo es el número adimensional de Reynolds, con el cual trabajaremos y en el que nos apoyaremos a medida que avancemos en el trabajo. Dicho esto, en nuestro dominio de fluido, tendremos zonas laminares, zonas turbulentas y zonas de transición. (Çengel, 2012)

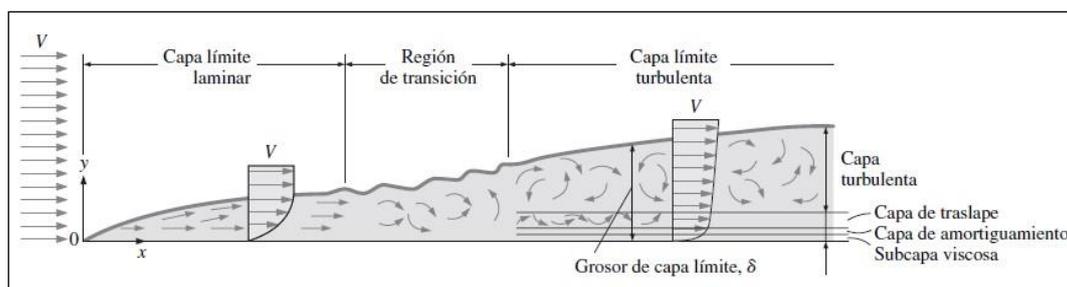


Figura 6. Desarrollo de la capa límite para flujo sobre placa plana, y los diferentes patrones de flujo (no a escala). (Çengel, 2012)

### **Flujo estacionario en comparación con el no-estacionario**

El concepto estacionario implica que no hay cambio en un punto con el tiempo. Lo opuesto a estacionario es no-estacionario. Por otro lado, quiero destacar, otros términos que tendemos a relacionarlos o a confundirlos con estos dos recién citados y no son para nada lo mismo, uno es el término uniforme que implica que no hay cambio con el lugar sobre una región especificada, y el otro es el término transitorio que es común aplicarlo a flujos en desarrollo. También podemos encontrarnos con el término periódico que se refiere a la clase de flujo no-estacionario en donde éste oscila en torno a una media estacionaria. (Çengel, 2012)

### **Flujos unidimensional, bidimensional y tridimensional**

Un campo de flujo se caracteriza de la mejor manera mediante la distribución de velocidad y, por consiguiente, se dice que un flujo es unidimensional, bidimensional o tridimensional si la velocidad del flujo varía en una, dos o tres dimensiones, respectivamente. El flujo que envuelve a nuestro autobús es un flujo tridimensional, si bien es verdad, que ciertas zonas alejadas de la geometría del autobús o zonas cercanas caracterizadas por una geometría homogénea podrían ser consideradas a efectos del cálculo como bidimensionales y en el caso de tener una de las dimensiones mucho más grande que otra y el flujo no cambiar de manera apreciable a lo largo de la dimensión de mayor longitud, el flujo se puede tomar como bidimensional. Un elemento que puede ser considerado de esta manera puede ser la varilla vertical del soporte de un espejo retrovisor del autobús o simplemente la antena del mismo, aunque a nuestros efectos no vamos a considerar tales elementos porque no añaden apenas peso a los resultados del estudio y aun considerando esta simplificación puede resultar complejo el cálculo si se les incluyese. (Çengel, 2012)

#### **3.1.2 Condición de no deslizamiento y capa límite**

Nuestro flujo de fluido se encuentra limitado por las superficies sólidas definidas según la geometría del autobús y resulta importante entender de qué manera la presencia de estas

superficies afecta al flujo. Sabemos que al aire no puede fluir a través de las superficies sólidas y las rodea. Es decir, la velocidad normal del aire en la superficie del autobús debe ser cero y el aire que se aproxima a esa superficie en forma normal llega a detenerse por completo al llegar a ésta. Lo que no es tan obvio es que el aire que se aproxima a la superficie del autobús, desde cualquier ángulo, también llega a detenerse por completo en la superficie del mismo y, por consiguiente, la velocidad tangencial del aire en la superficie también es cero. Esto es, que un fluido en contacto directo con un sólido “se pega” a la superficie debido a los efectos viscosos y no hay deslizamiento. A esta característica se le conoce como la condición de no deslizamiento.

Por lo tanto, la condición de no deslizamiento es responsable del desarrollo del perfil de velocidad. La región del fluido adyacente a la superficie del autobús que empezaremos a llamar pared, en la cual los efectos viscosos (y, por consiguiente, los gradientes de velocidades) son significativos se llama capa límite. La propiedad del fluido responsable de la condición de no deslizamiento y del desarrollo de la capa límite es la viscosidad. Otra consecuencia de la condición de no deslizamiento es la resistencia al movimiento de una superficie, la cual es la fuerza que un fluido ejerce sobre una superficie en la dirección del flujo. (Çengel, 2012)

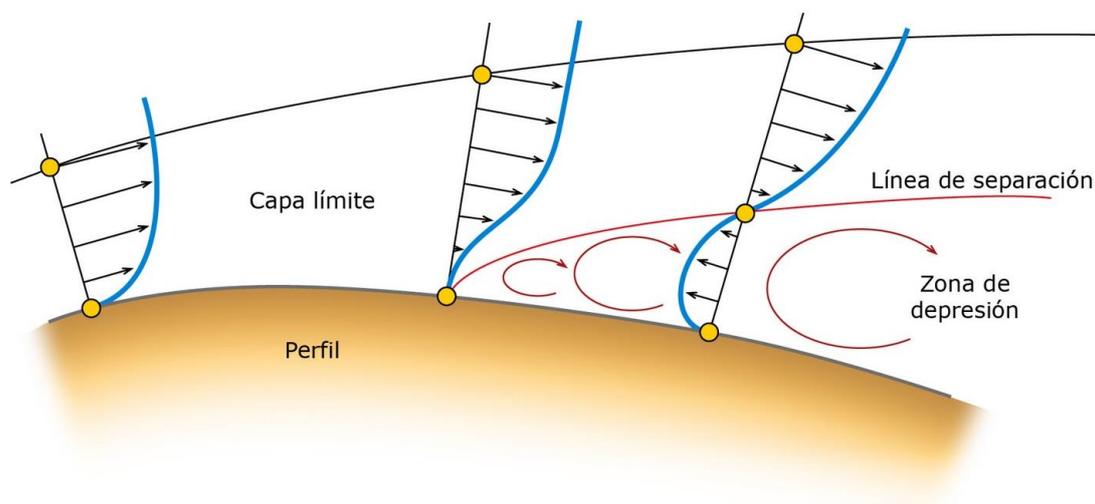


Figura 7. Separación de flujo. (Pérez, 2015)

También sabemos que cuando se fuerza al fluido a moverse sobre una superficie curva con una velocidad suficientemente elevada, la capa límite ya no puede permanecer adherida a la superficie y, en algún punto, se separa de ella; este fenómeno se conoce como separación del flujo y se describe en la Figura 7. (Pérez, 2015). Tenemos que tener en cuenta

que la condición de no deslizamiento se aplica en todas partes a lo largo de la superficie, incluso corriente abajo del punto de separación, es decir, si encontráramos en alguna zona del autobús en la que ocurra el fenómeno de separación hemos de saber que la condición de no deslizamiento seguirá conservándose en todos los puntos siguientes de la superficie del autobús.

No se citan las expresiones generales de la capa límite ya que vamos a resolver el problema con CFD y no será necesario usar estas expresiones. No obstante, a lo largo del trabajo nos iremos refiriendo progresivamente a la capa límite en los aspectos que la influyeran.

## 3.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Las características de los sistemas se conocen como propiedades. Algunas propiedades conocidas son la presión  $P$ , la temperatura  $T$ , el volumen  $V$ , y la masa  $m$ . Algunas menos conocidas son la viscosidad, conductividad térmica, módulo de elasticidad, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica, e incluso, la velocidad y la altura. Se considera que las propiedades son intensivas o extensivas. Las propiedades intensivas son independientes de la masa de un sistema, como la temperatura, la presión y la densidad. Las propiedades extensivas son aquellas cuyos valores dependen del tamaño, o extensión, del sistema. La masa total, el volumen total  $V$ , y la cantidad total de movimiento son ejemplos de propiedades extensivas. En general, se usan letras mayúsculas para denotar las propiedades extensivas (la masa  $m$  es una excepción importante) y minúsculas para las propiedades intensivas (las excepciones obvias son la presión  $P$  y la temperatura  $T$ ). Las propiedades extensivas por unidad de masa se llaman propiedades específicas.

El estado de un sistema se describe por sus propiedades. Con base en la experiencia, se conoce que no es necesario especificar todas las propiedades para identificar un estado, es decir, la especificación de un cierto número de propiedades es suficiente para identificar un estado, siendo estas propiedades independientes entre sí y lo serán cuando se puede hacer variar una de ellas mientras que la otra permanece constante. (Çengel, 2012)

Desde el punto de vista del estudio de la aerodinámica frontal del autobús nos interesan dos propiedades fundamentales del aire, la densidad y la viscosidad.

### 3.2.1 Densidad

La densidad se define como la masa por unidad de volumen.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

El inverso de la densidad es el volumen específico  $v$ , el cual se define como volumen por unidad de masa. Es decir,  $v = V/m = 1/\rho$ . Para un elemento diferencial de volumen de masa,  $dm$  y de volumen,  $dV$ , la densidad se puede expresar como,  $\rho = dm/dV$ . En general, la densidad de los gases depende de la temperatura y de la presión. La densidad de la mayoría de los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. Un gas ideal es una sustancia hipotética que obedece la relación  $Pv = RT$ , conocida como ecuación de estado de gas ideal. De manera experimental se observa que la relación aproxima con una buena precisión el comportamiento P-v-T de los gases reales a bajas densidades, como es el caso del aire. A bajas presiones y altas temperaturas, la densidad de un gas decrece y tal gas se comporta como un gas ideal. En el rango del interés práctico, muchos gases como el aire se pueden tratar como gases ideales con error despreciable (a menudo, menor del 1 por ciento). (Çengel, 2012)

Los autobuses alcanzan velocidades máximas muy alejadas de la velocidad del sonido, y por lo tanto la variación de presión y temperatura en el campo del flujo varía poco con respecto a los valores correspondientes al flujo libre del fluido a cierta distancia del autobús. Para asentar esta afirmación recurrimos al número de Mach y se puede afirmar que, para gases como el aire, las variaciones relativas de densidad serán tanto menores cuanto más pequeño sea el cuadrado del número de Mach:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \sim \frac{V^2}{c^2} \sim Ma^2 \quad (3)$$

Donde  $V$  es la velocidad del autobús considerando viento en contra al sentido de su marcha, que en condiciones adversas podría llegar a unos 40 m/s;  $c$  es la velocidad del sonido en el aire que en condiciones normales (1 atm y 288 K) está en el orden de unos 340 m/s.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \sim \frac{V^2}{c^2} = \frac{40^2}{340^2} = 1.834 \times 10^{-2}$$

En consecuencia, resulta apropiado suponer para nuestro estudio que la densidad no varía, y que el aire se comporta como un fluido incompresible teniendo en cuenta además que el flujo lo podemos considerar isoterma. (Brunel Vázquez, 2009)

### 3.2.2 Viscosidad

Existe una propiedad que representa la resistencia interna de un fluido al movimiento, y esa propiedad es la viscosidad. La fuerza que un fluido fluyente ejerce sobre nuestro autobús en la dirección del flujo se llama fuerza de arrastre, y la magnitud de ésta depende, en parte, de la viscosidad. Nuestro fluido, el aire, es un fluido newtoniano siendo la razón de deformación, que es el gradiente de velocidad del fluido, proporcional al esfuerzo cortante.

En general, la viscosidad de un fluido depende tanto de la temperatura y de la presión, si bien es verdad que la dependencia respecto a la presión es más bien débil. Para los gases, la viscosidad dinámica ( $\mu$ ) es prácticamente independiente de la presión para rangos que varían entre presiones bajas y presiones moderadas, pero no será así para la viscosidad cinemática ( $\eta$ ) dado que la densidad de un gas es proporcional a su presión. Por otro lado, la viscosidad varía mucho con la temperatura y se incrementa con la temperatura. La explicación reside en que en un gas las fuerzas intermoleculares son despreciables y a altas temperaturas las moléculas de los gases se mueven de forma aleatoria a velocidades más altas. Esto conduce a que se produzcan más colisiones moleculares y, en consecuencia, una mayor resistencia al flujo. (Mataix, 1986; Çengel, 2012)

Siguiendo el mismo planteamiento anterior de la densidad, consideramos que la viscosidad del aire que envuelve al autobús no varía ya que no hay elevadas variaciones de presión y el flujo a sus efectos es isoterma.

### **3.3 CINEMÁTICA DE FLUIDOS**

#### **3.3.1 Descripción Lagrangiana y Euleriana.**

La cinemática de fluidos estudia el movimiento de los fluidos sin considerar necesariamente las causas que lo producen. Para estudiar como fluyen los fluidos y describir su movimiento recurrimos a dos maneras de describirlo. La descripción lagrangiana que exige rastrear la posición y la velocidad de cada partícula individual del fluido, llamada partícula fluida, y considerarla como una porción con identidad fija. La descripción lagrangiana es análoga al análisis de sistemas (sistemas cerrados) donde se sigue una masa fija. Como cabe esperar, es muy complicado seguir cada partícula de fluido. Sin embargo, contamos con la descripción euleriana como método más común en la descripción de fluidos. En la descripción euleriana se define un volumen finito, llamado volumen de control, a través del cual el fluido fluye hacia dentro y hacia fuera. En lugar de rastrear partículas individuales de fluido, se definen variables de campo dentro del volumen de control que serán funciones del tiempo y del espacio. (Çengel, 2012)

Estas variables de campo definen el campo del flujo en cualquier lugar e instante dentro del volumen de control. En la descripción euleriana en realidad no importa lo que les sucede a las partículas del flujo por separado; en lugar de ello, se centra la atención en la velocidad, presión o en las variables en las que se desee tener conocimiento de cualquiera que sea la partícula de fluido que llegue a estar en el lugar y momento de interés. Un ejemplo práctico que refuerza esta idea es que, si tuviéramos que resolver nuestro problema en un túnel de

viento, por lo general se colocaríamos sondas de presión y velocidad en una ubicación fija del fluido, midiendo así velocidad:  $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$  y presión:  $P = P(x, y, z, t)$ , y esto sería un ejemplo de descripción euleriana.

Dicho esto, en nuestro caso tendremos un campo de flujo definido por las siguientes variables de campo (descripción euleriana), que en el caso más general son:

-Campo de presión:  $P = P(x, y, z, t)$

-Campo de velocidad:  $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$

Si desarrollamos el campo de velocidad en coordenadas cartesianas  $(x, y, z), (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  tenemos:

$$\vec{V} = (u, v, w) = u(x, y, z, t)\vec{i} + v(x, y, z, t)\vec{j} + w(x, y, z, t)\vec{k}$$

-Campo de aceleración:  $\vec{a} = \vec{a}(x, y, z, t)$

La aceleración de una partícula de fluido (descripción lagrangiana) la definimos como:

$$\vec{a}_{partícula} = \frac{d\vec{V}_{partícula}}{dt} = \frac{d\vec{V}(x_{partícula}, y_{partícula}, z_{partícula}, t)}{dt} \quad (4)$$

Desarrollando esta ecuación llegamos a:

$$\vec{a}_{partícula} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial x_{partícula}} \cdot \frac{dx_{partícula}}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial y_{partícula}} \cdot \frac{dy_{partícula}}{dt} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial z_{partícula}} \cdot \frac{dz_{partícula}}{dt} \quad (4.1)$$

Considerando en cualquier instante que el vector de posición material  $(x_{partícula}, y_{partícula}, z_{partícula})$  de la partícula de fluido en el marco de referencia lagrangiano es igual al vector de posición  $(x, y, z)$  en el marco euleriano, tenemos:

$$\vec{a}_{partícula}(x, y, z, t) = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \quad (4.2)$$

Además, en cualquier instante  $t$ , el campo de aceleración debe ser igual a la aceleración de la partícula de fluido que llegue a ocupar la ubicación  $(x, y, z)$  en ese instante  $t$ , ya que, por definición, la partícula de fluido se está acelerando con el flujo del fluido; obteniendo así el campo de aceleración (descripción euleriana):

$$\vec{a}(x, y, z, t) = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (4.3)$$

Nuestra expresión de aceleración contiene una aceleración local que será cero para fluidos estacionarios y una aceleración convectiva que explica el efecto por el cual el flujo se desplaza hacia otro lugar donde el valor del campo de velocidad es diferente. (Çengel, 2012)

$$\vec{a}(x, y, z, t) = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (5)$$

### 3.3.2 Teorema del transporte de Reynolds

La mayoría de los principios de la mecánica de fluidos se adoptan de la mecánica de los sólidos, en donde las leyes físicas que se refieren a las razones de cambio respecto del tiempo de propiedades extensivas se expresan para sistemas. En la mecánica de fluidos, tal y como acabamos de ver con nuestras variables de campo es más conveniente trabajar con volúmenes de control y, por lo tanto, surge la necesidad de relacionar los cambios en un sistema con los cambios en un volumen de control, que es lo que acabamos de hacer con la aceleración, pasar de la aceleración de una partícula de fluido del sistema a la aceleración de un punto del campo de flujo en nuestro volumen de control. La relación entre las razones de cambio respecto del tiempo de una propiedad extensiva para un sistema y para un volumen de control se expresa por el teorema del transporte de Reynolds (RTT, Reynolds transport theorem), el cual proporciona el vínculo entre los enfoques de sistema y de volumen de control. (Çengel, 2012)

De esta manera, se puede pasar con facilidad, al partir de las leyes fundamentales de conservación del sistema (punto de vista lagrangiano), a formas que son válidas y útiles en un análisis del volumen de control (punto de vista euleriano). El teorema del transporte de Reynolds para volúmenes finitos (análisis integral) es análogo a la derivada material para volúmenes diferenciales (análisis diferencial). En ambos casos, se transforma de un punto de vista lagrangiano o de sistema a un punto de vista euleriano o de volumen de control. En el caso de la aceleración anteriormente desarrollada (5) tenemos un claro ejemplo de derivada material, donde la aceleración del campo es la derivada material del campo de velocidad. Tanto para una propiedad extensiva  $B$  o para su correspondiente propiedad intensiva  $b$ , tenemos: (Çengel, 2012)

Derivada material:

$$\frac{Db}{Dt} = \frac{\partial b}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)b \quad (6)$$

Teorema del transporte de Reynolds (RTT):

$$\frac{dB_{sist}}{dt} = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dv + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (7)$$

En ambas ecuaciones, el cambio total de la propiedad, siguiendo la propiedad de una partícula de fluido o siguiendo propiedad de un sistema, está formado por dos partes: una parte local (no estacionaria) y una parte convectiva (de movimiento).

### 3.3.3 Fundamentos de visualización del flujo

En este trabajo calcularemos y trabajaremos con CFD (dinámica de fluidos computacional) patrones de flujo como líneas de corriente, gráficas vectoriales y otras visualizaciones del flujo. Para lo cual, en este apartado daremos unas pinceladas básicas de fundamento teórico de los mismos para luego poder interpretar los resultados y las visualizaciones del flujo de manera correcta.

#### Líneas de corriente

Una línea de corriente es una curva que en todas partes es tangente al vector velocidad instantáneo. Las líneas de corriente son útiles como indicadores de la dirección instantánea del movimiento del fluido en todo el campo de flujo. Las regiones de recirculación del flujo y de separación de un fluido de la superficie de nuestro autobús se identificarán con facilidad por el patrón de líneas de corriente. (Çengel, 2012)

La expresión analítica de una línea de corriente será:

$$\frac{dr}{V} = \frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \quad (8)$$

Donde  $\vec{dr} = dx\vec{i} + dy\vec{j} + dz\vec{k}$  es una longitud infinitesimal de arco a lo largo de una línea de corriente;  $\vec{dr}$  es paralelo al vector velocidad  $\vec{V}$  que será:  $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ .

#### Líneas de trayectoria

Una línea de trayectoria es la trayectoria real recorrida por una partícula de fluido durante algún periodo. Una línea de trayectoria es un concepto lagrangiano en el que sencillamente se sigue de una partícula de fluido conforme se desplaza en el campo de flujo. Las líneas de trayectorias nos pueden aportar diversa información del flujo. Si resolviéramos nuestro ejercicio aerodinámico de manera experimental podríamos medir el campo de velocidad de nuestro flujo a partir de las líneas de trayectoria de partículas sobre un plano en un flujo mediante una técnica experimental moderna conocida como PIV (velocimetría por imagen de partículas). Obviamente, esta técnica requiere de medios y conocimientos

avanzados para poder desarrollarse de manera adecuada que escapan de nuestras posibilidades. (Çengel, 2012) Lo que se está queriendo decir en este párrafo no es más que un ejemplo de la aplicación que podrían tener las líneas de trayectoria.

También se pueden calcular las líneas de trayectoria de forma numérica para un campo de velocidad conocido, o en nuestro caso, una vez resuelto el campo de velocidad.

La expresión analítica de una línea de trayectoria será:

$$\vec{x} = \vec{x}_{Inicio} + \int_{t_{inicio}}^t \vec{V} dt \quad (9)$$

Si el campo de velocidad es estacionario, cada una de las partículas de fluido seguirá líneas de corriente; por tanto, para el flujo estacionario, las líneas de trayectoria son idénticas a las líneas de corriente.

### **Línea de traza**

Una línea de traza es el lugar geométrico de las partículas de fluido que han pasado de manera secuencial por un punto prescrito en el flujo o, expresado de otra manera, una línea de traza es una fotografía instantánea de un patrón de flujo integrado respecto del tiempo. En los experimentos físicos de los túneles de viento, se inyecta en forma continua un fluido trazador que es típicamente humo y el patrón resultante de flujo es una línea de traza. Para un campo conocido de velocidad, una línea de traza se puede calcular en forma numérica, aun con cierta dificultad. Es necesario seguir en el tiempo las trayectorias de flujo continuo de partículas trazadoras, desde el instante de su inyección hasta el instante actual. Expresado matemáticamente, la expresión de la partícula trazadora queda:

$$\vec{x} = \vec{x}_{inyección} + \int_{t_{inyección}}^{t_{actual}} \vec{V} dt \quad (10)$$

Si el flujo es estacionario, las líneas de corriente, las de trayectoria y las de traza son idénticas. (Çengel, 2012)

### **Líneas fluidas**

Una última descripción que haremos en esta familia de líneas de visualización de flujo serán las líneas fluidas (línea de tiempo), una línea fluida es un conjunto de partículas adyacentes de fluido que se marcaron en el mismo instante. Las líneas fluidas son particularmente útiles para situaciones en donde se va examinar la uniformidad de un flujo (o la falta de ello).

### 3.3.4 Gráficas sobre flujos de fluidos

Una vez que resolvamos el ejercicio de este trabajo, haremos gráficas con los datos del flujo de fluido obtenidos, para así interpretar los resultados y poder transmitir la información obtenida de manera más fácil. A continuación, se muestran las gráficas que vamos a desarrollar con dichos datos.

#### Gráficas de perfiles

Una gráfica de perfiles indica cómo varía el valor de una propiedad escalar a lo largo de la dirección deseada en el campo de flujo. En este tipo de gráficas podemos ver cómo varía una variable en función de una segunda variable. Por supuesto, que serán variables escalares como la presión, la velocidad (magnitud de la misma o magnitud de una de sus componentes), etcétera. La gráfica que se muestra en la

Figura 8, es la gráfica del perfil de velocidad, es una gráfica típica e importante que usaremos porque nos aportará mucha información, ya que como se ve en esta

Figura 8, nos permitirá ver la famosa capa límite entre otras cosas. (Çengel, 2012)



Figura 8. Gráfica del perfil velocidad. (Çengel, 2012)

Quizás en alguna ocasión, encontremos o representemos esta misma gráfica, pero con flechas que representan el vector de velocidad en la dirección de la componente de velocidad representada, es decir, la gráfica del perfil de velocidad se convierte en una del vector de velocidad como la de la Figura 9, que mostramos a continuación. (Çengel, 2012)

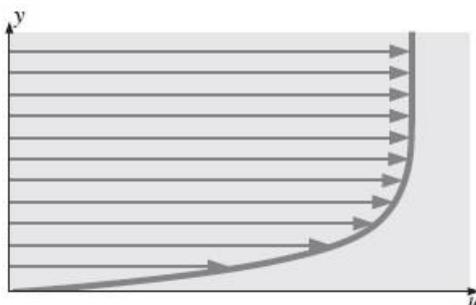


Figura 9. Gráfica del perfil velocidad convertida en gráfica vectorial de velocidad.

(Çengel, 2012)

### **Gráficas vectoriales**

Una gráfica vectorial es un conjunto de flechas que indican la magnitud y dirección de una propiedad vectorial en un instante. Las líneas de corriente indican la dirección del campo de velocidad instantánea, no indican de manera directa la magnitud de velocidad, por este motivo, introduciremos gráficas vectoriales para interpretar los resultados. En la Figura 10, damos un ejemplo de gráfica vectorial para así ver cómo se diferencian del resto de tipos de gráficas y aprovechamos también representar una condición de simetría, donde en la gráfica se representa una mitad cuya información es aplicable a la otra mitad que no se modela; en el caso de nuestro autobús podría simularse esta condición, pero no lo haremos por motivos de la determinación del centro aerodinámico (hablaremos de él más adelante). La condición de simetría se encuentra en cualquiera de las gráficas de las que estamos hablando. (Çengel, 2012)

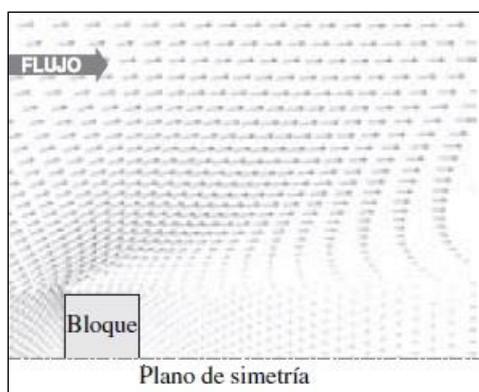


Figura 10. Gráfica vectorial genérica. (Çengel, 2012)

### **Gráficas de contornos**

Otro tipo de gráfica que vamos a usar de manera frecuente es la gráfica de contornos, que muestra las curvas de valor constante de una propiedad escalar (o magnitud de una propiedad vectorial) en un determinado instante. Con la gráfica de contornos se puede relevar con rapidez las regiones de valores altos (o bajos) de una propiedad del flujo que se está estudiando. Las gráficas de contorno las podemos encontrar con rellenos de colores y las llamaremos gráficas de contorno rellenas. Esto queda reflejado en la Figura 11, donde damos un ejemplo de representación de este tipo. (Çengel, 2012)

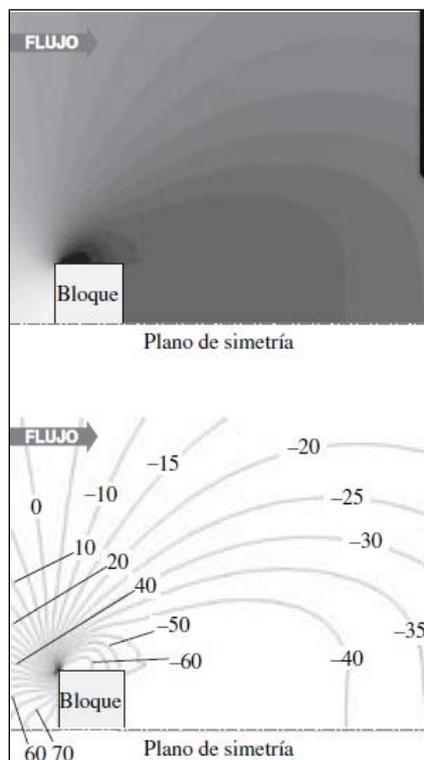


Figura 11. Gráfica de contorno y de contorno relleno genérica. (Çengel, 2012)

### 3.3.5 Vorticidad y rotacionalidad

Una propiedad cinemática que tiene gran importancia para el análisis de los flujos de fluidos es el vector de vorticidad que se define matemáticamente como el rotacional del vector de velocidad  $\vec{V}$ .

Vector de vorticidad:

$$\vec{\xi} = \vec{V} \times \vec{V} = \text{rot}(\vec{V}) \quad (11)$$

Por lo tanto, la vorticidad es una medida de la rotación de una partícula de fluido. La vorticidad es igual al doble de la velocidad angular de una partícula de fluido.

Vector razón de rotación:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \vec{V} \times \vec{V} = \frac{1}{2} \text{rot}(\vec{V}) = \frac{\vec{\xi}}{2} \quad (12)$$

Si la vorticidad en un punto en un campo de flujo es diferente de cero, la partícula de fluido que llegue a ocupar ese punto en el espacio está girando y entonces diremos que el flujo en esa región es rotacional. De modo semejante, si la vorticidad en una región del flujo es cero (o despreciablemente pequeña) las partículas de fluido allí no están girando y diremos entonces que el flujo en esa región es irrotacional. Desde el punto de vista físico, las partículas de fluido que están en una región rotacional de un flujo giran sobre sí mismas a medida que avanzan en ese flujo. Como vemos en la Figura 12, las partículas de fluido dentro de la capa

límite viscosa cercana a una pared sólida son rotacionales (y, por lo tanto, tienen vorticidad diferente de cero), en tanto que las partículas de fluido que están afuera de la capa límite son irrotacionales (y su vorticidad es cero). (Çengel, 2012)

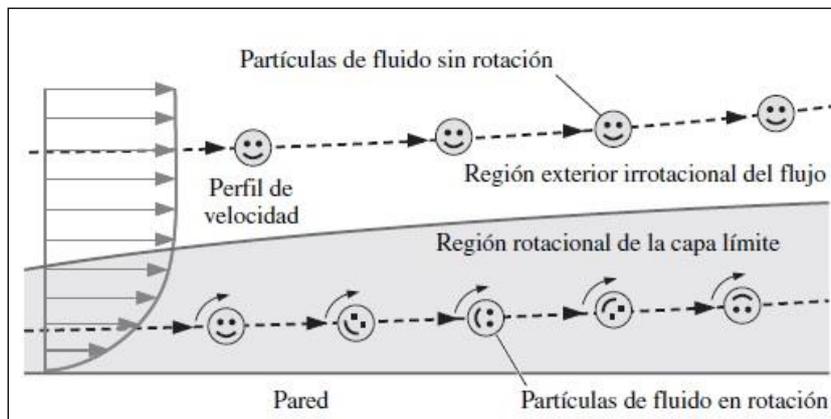


Figura 12. Rotacionalidad e irrotacionalidad del flujo de fluido. (Çengel, 2012)

### 3.4 ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli es una relación aproximada entre la velocidad, la presión y la altura, y es válida en regiones de flujo estacionario e incompresible en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables. La aproximación clave en la que se basa la ecuación de Bernoulli es que los efectos viscosos son despreciablemente pequeños en comparación con los efectos de inercia, de presión y gravitacionales. Puesto que todos los fluidos tienen viscosidad (no existe un “fluido no viscoso”), esta aproximación no es válida para todo un campo de flujo. En otras palabras, no se puede aplicar la ecuación de Bernoulli en todas partes en un flujo, sin importar lo pequeña que sea la viscosidad del fluido. Sin embargo, resulta que la aproximación es razonable en ciertas regiones de muchos flujos. Se hace referencia a esas regiones como regiones no viscosas del flujo y son regiones en donde las fuerzas viscosas o de fricción netas son despreciablemente pequeñas en comparación con las otras fuerzas que actúan sobre las partículas del fluido. En general, los efectos de la fricción siempre son importantes muy cerca de las paredes sólidas (capas límite) y directamente corriente abajo de los cuerpos (estelas). Por tanto, como vemos en la Figura 13, la aproximación de Bernoulli es útil por lo general en regiones del flujo por fuera de las capas límite y estelas, en donde el movimiento del fluido lo rigen los efectos combinados de la presión y la gravedad. (Mataix, 1986; Çengel, 2012)

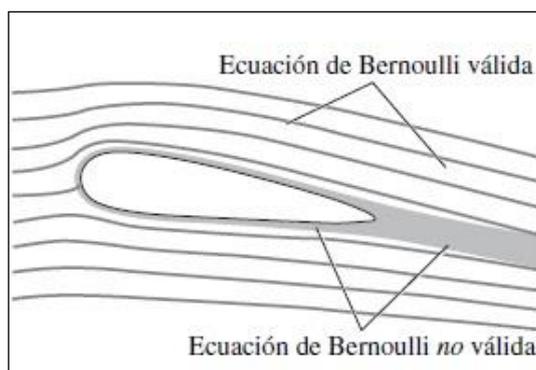


Figura 13. Zona de capa límite y estelas. (Çengel, 2012)

En nuestro caso que tendremos flujo estacionario e incompresible, la ecuación de Bernoulli será:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante (a lo largo de una línea de corriente)} \quad (13)$$

Se conoce al término  $\frac{P}{\rho}$  como energía de presión,  $\frac{V^2}{2}$  como energía cinética y  $g \cdot z$  como energía potencial. Por lo tanto, la ecuación de Bernoulli puede concebirse como una expresión del balance de energía mecánica y se puede enunciar del modo siguiente: “La suma de la energía cinética, la potencial y de flujo de una partícula de fluido es constante a lo largo de una línea de corriente en el transcurso del flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables”. (Çengel, 2012)

### 3.4.1 Presión estática, dinámica y de estancamiento

La ecuación de Bernoulli determina que la suma de la energía de presión (energía del flujo), la cinética y la potencial de una partícula de fluido a lo largo de una línea de corriente es constante. Por lo tanto, la energía cinética y la potencial del fluido pueden convertirse a energía de presión (y viceversa) en el curso del flujo, lo cual hace que cambie la presión. Este fenómeno puede hacerse más visible cuando se multiplica la ecuación de Bernoulli por la densidad  $\rho$ :

$$P + \frac{\rho V^2}{2} + \rho gz = \text{constante (a lo largo de una línea de corriente)} \quad (14)$$

Cada término de esta ecuación tiene unidades de presión y, por tanto, cada uno representa alguna clase de presión:

- P es la presión estática (no incorpora efectos dinámicos); representa la presión real del fluido. Ésta es la misma que la presión usada en la termodinámica y las tablas de propiedades.

-  $\frac{\rho V^2}{2}$  es la presión dinámica, representa el aumento en la presión cuando el fluido en movimiento se detiene de manera isentrópica (no hay transferencia de calor en el proceso).

-  $\rho g z$  es la presión hidrostática, la cual no es presión en un sentido real, porque su valor depende del nivel de referencia seleccionado; explica los efectos de la altura.

La suma de la presión estática y la dinámica se llama presión de estancamiento. La presión de estancamiento representa la presión en un punto en donde el fluido se detiene totalmente de manera isentrópica. En nuestro estudio encontraremos líneas de corriente que se extienden desde lejos hasta el punto de estancamiento y se llaman líneas de corriente de estancamiento. (Çengel, 2012)

### 3.4.2 Limitaciones en la aplicación de Bernoulli

Vamos a expresar las limitaciones que encontramos en la ecuación de Bernoulli ya que como dijimos en la primera línea de este apartado es una aproximación y cuenta con algunas consideraciones que nos restringen su uso.

-Flujo estacionario; la primera limitación de la ecuación de Bernoulli consiste en que es aplicable al flujo estacionario. Por lo tanto, no debe usarse durante los periodos transitorios, o durante los periodos de cambio en las condiciones de flujo.

-Flujo sin fricción; en todo flujo interviene algo de fricción y los efectos de la fricción pueden ser despreciables o no. En general, los efectos de la fricción son despreciables para secciones cortas del flujo, con secciones transversales grandes, en especial con velocidades bajas del flujo. Los efectos de la fricción suelen ser importantes en pasos largos y estrechos del flujo, en la región de la estela corriente abajo de un cuerpo y en las secciones de flujo divergente, debido a la mayor posibilidad de que el fluido se separe de las paredes en esas configuraciones geométricas. Los efectos de la fricción también son significativos cerca de las superficies sólidas y, por tanto, la ecuación de Bernoulli suele ser aplicable a lo largo de una línea de corriente en la región del núcleo del flujo, pero no a lo largo de la línea de corriente cercana a la superficie. Un accesorio que perturbe la estructura de líneas de corriente del flujo y, en consecuencia, cause una mezcla y un contraflujo considerables, como el paso de rueda del autobús, los espejos, la estructura exterior del aire acondicionado pueden hacer que la ecuación de Bernoulli no pueda aplicarse ahí.

-Flujo incompresible; una de las hipótesis establecidas en la deducción de la ecuación de Bernoulli es que la densidad es constante y, por tanto, el flujo es incompresible. Esta condición la satisfacen los gases con números de Mach menores a 0.3. Existe una versión de Bernoulli para flujo compresible.

-Ninguna transferencia de calor; la densidad de un gas es inversamente proporcional a la temperatura y no debe usarse la ecuación de Bernoulli para las secciones del flujo en el que se tenga un cambio significativo en la temperatura.

-Flujo a lo largo de una línea de corriente; la ecuación de Bernoulli es aplicable a lo largo de una línea de corriente y, en general, el valor de la constante de la suma de sus términos es diferente para distintas líneas de corriente. Pero cuando una región del flujo es irrotacional y, en consecuencia, no hay vorticidad en el campo de flujo, el valor de la constante continúa siendo el mismo para todas las líneas de corriente y, por lo tanto, la ecuación de Bernoulli se vuelve también aplicable a través de esas líneas de corriente. Por lo tanto, no es necesario preocuparse por las líneas de corriente cuando el flujo es irrotacional y puede aplicarse la ecuación de Bernoulli entre dos puntos cualesquiera en la región irrotacional del flujo. (Çengel, 2012)

El beneficio de todo esto es la sencillez y la rapidez para aplicarlo.

### 3.5 ANÁLISIS DIFERENCIAL DEL FLUJO DE FLUIDOS

Ahora vamos a hablar de las ecuaciones diferenciales fundamentales que rigen el comportamiento de los fluidos, es decir, los principios más íntimos a los cuales obedecen todos los fluidos sin excepción alguna. Para casos sencillos en donde el flujo es laminar y la geometría es relativamente simple, estas ecuaciones pueden resolverse con relativa tranquilidad, pero en los casos en donde aparecen fenómenos turbulentos estas ecuaciones por desgracia son muy difíciles de resolver por lo que se tiene que recurrir a soluciones aproximadas y/o numéricas. Para más inri, el flujo de aire que fluirá alrededor de nuestro autobús se verá afectado por algunos fenómenos turbulentos lo que nos hará recurrir a apoyarnos en modelos de turbulencia de CFD para poder resolver el problema.

Las ecuaciones de las que estamos hablando son dos, la conservación de la masa que es la ecuación de continuidad y la segunda Ley de Newton que es la ecuación de Navier-Stokes. Dichas ecuaciones se aplican a cada punto en el campo de flujo y por lo tanto permiten resolver los detalles del flujo en todas partes en el dominio del flujo.

#### 3.5.1 Ecuación de la continuidad

La ecuación de la continuidad no deja de ser la conservación de la masa, pero escrita para un volumen de control diferencial, es decir, en el fondo es la ecuación diferencial general de la conservación de la masa. Su expresión en la forma más general posible es la siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (15)$$

En nuestro caso, consideramos el flujo incompresible, por lo tanto, la densidad no es función del tiempo. Entonces, el término  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  es nulo y  $\rho$  se puede sacar fuera del operador de divergencia. En consecuencia, la ecuación de continuidad para flujo incompresible será:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (16)$$

En esta ecuación no quedan derivadas parciales con respecto al tiempo. A partir de esto se llega a la conclusión que inclusive si el flujo es no-estacionario, la ecuación se aplica en cualquier instante. Físicamente, esto significa que conforme el campo de velocidad vaya cambiando en una parte de un campo de fluido incompresible, el resto del campo de flujo se ajustará inmediatamente al cambio, de modo que la ecuación nos satisface en todo momento. Desarrollando un poco la ecuación anterior, la ecuación de la continuidad nos queda:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

### 3.5.2 Ecuación de Navier-Stokes

La ecuación de Navier-Stokes, se expresa en varias formas según las condiciones que presente el flujo de fluido. Nosotros vamos a plasmarla para el caso que nos compete, es decir, asumiendo las condiciones que presenta nuestro flujo. Dicho lo cual, para un fluido incompresible y para un fluido newtoniano, como es el aire, donde entendemos que el fluido para un esfuerzo de corte es linealmente proporcional a la razón de deformación de corte, o lo que es lo mismo, que el tensor de esfuerzo es linealmente proporcional al tensor de razón de deformación, junto con que, en nuestro caso, consideremos un flujo incompresible y suponemos un flujo aproximadamente isotérmico, sabiendo que los cambios de temperatura son muy pequeños o inexistentes, la ecuación de Navier-Stokes nos queda:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla \vec{P} + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (18)$$

La ecuación de Navier-Stokes es la base de la mecánica de fluidos al nivel más íntimo posible. Es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, no-lineal e inestable. Si fuera posible resolverla para cualquier geometría, este trabajo tendría menos de la mitad de fundamento teórico y no tendríamos que recurrir a modelos de turbulencia en CFD, ya que tendríamos soluciones analíticas para el flujo de aire que envuelve al autobús.

Esta ecuación es una expresión vectorial válida en cualquier sistema coordenado ortogonal. Es una ecuación con cuatro incógnitas (tres de las componentes de velocidad y la

presión), aunque sólo presenta tres ecuaciones (tres componentes porque es una ecuación vectorial). Obviamente se necesitará una ecuación más que será la de la continuidad para fluido incompresible.

### **Aplicación de las ecuaciones al problema**

La teoría de análisis diferencial de flujo de fluidos nos dice que hay dos tipos de problemas para los que son útiles las ecuaciones diferenciales (continuidad y Navier-Stokes):

-Cálculo del campo de presión para un campo de velocidad conocido, que no es nuestro caso.

-Cálculo del campo de velocidad y presión para un fluido que recorre una geometría conocida y condiciones frontera conocidas, que se trata de nuestro caso. Para ello aplicaremos las ecuaciones anteriormente explicadas (17) y (18) que desarrollándolas un poco adquirirán la siguiente forma:

Ecuación de la continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

Ecuaciones de Navier-Stokes para las tres componentes de velocidad:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (19)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (20)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (21)$$

Nosotros vamos a resolver el flujo de fluido asumiendo el régimen estacionario por lo que el término de velocidad con respecto al tiempo se convertirá en cero (condición estacionaria). Si tratásemos de resolver estas ecuaciones para nuestro flujo de fluido de manera directa nos encontraríamos con que no es posible obtener soluciones analíticas exactas de la ecuación de Navier-Stokes ya el flujo es turbulento. Las soluciones exactas son posibles solo para flujo laminar. Esto se debe a que el flujo turbulento contiene remolinos tridimensionales no estacionarios aleatorios que mezclan el fluido. Más aún, dichos remolinos pueden variar en tamaño sobre varios órdenes de magnitud. Además, en régimen turbulento no podemos ignorar ningún término de las ecuaciones excepto el de gravedad ( $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$ ) para fluidos como el aire y en las condiciones en la que estamos trabajando. Por lo tanto,

recurriremos enseguida a un comodín para poder resolver el problema, este comodín es usar un modelo de turbulencia de CFD del que hablaremos a continuación. (Çengel, 2012)

### 3.6 CÁLCULO CON CFD DE FLUJO TURBULENTO

Tal y como acabamos de mencionar, debido a la imposibilidad de resolver las ecuaciones de los fluidos en nuestro problema de flujo turbulento vamos a ayudarnos de CFD. El motivo principal que nos lleva a esta situación es que, en la consideración más detallada de flujo turbulento, el campo de flujo turbulento es siempre no estacionario y tridimensional porque se crean estructuras vorticiales aleatorias, de movimiento giratorio, llamadas remolinos de turbulencia, que surgen de todas las orientaciones en un flujo turbulento. Dándole otra interpretación podemos decir que el flujo estacionario en régimen turbulento no existe de manera estricta, y cuando hagamos esta consideración tendremos en cuenta que el flujo será estacionario en promedio. (Çengel, 2012)

La primera técnica que nos ofrece el CFD es la simulación numérica directa, DNS, donde se intenta resolver el movimiento no estacionario de todas las escalas del flujo turbulento. Sin embargo, las diferencias en tamaño y en escala de tiempo entre los remolinos mayor y menor pueden ser de varios órdenes de magnitud ( $L \gg \eta$ ) como vemos en la Figura 14. Además, estas diferencias se incrementan con el número de Reynolds, lo cual hace los cálculos de DNS de flujo turbulento aún más difíciles a medida que aumenta el número de Reynolds. Las soluciones de DNS demandan mallas tridimensionales extra finas, ordenadores muy grandes y una enorme cantidad de tiempo del CPU. Por lo tanto, esta opción es inviable para nosotros. (Çengel, 2012)



Figura 14. Turbulencias que resuelve la técnica DNS. (Çengel, 2012)

El siguiente nivel abajo de la DNS es la simulación de remolinos grandes con la técnica LES. Con esta técnica se obtienen a la escala grande las características no estacionarias de los remolinos turbulentos, mientras que se modelan los remolinos turbulentos disipativos de pequeña escala tal y como vemos en la Figura 15. La suposición básica es que los remolinos turbulentos más pequeños son isotrópicos; es decir, se supone que los remolinos pequeños son independientes de la orientación de sistema de coordenadas y siempre se comportan de manera estadísticamente similar y predecible, cualquiera que sea el campo de flujo turbulento. En comparación con DNS, LES demanda una cantidad de los recursos

computacionales considerablemente menores porque se elimina la necesidad de resolver los remolinos más pequeños presentes en el campo de flujo, y, aun así, con la tecnología computacional que disponen los ordenadores con los que vamos a resolver este trabajo, estamos tremendamente limitados para poder utilizar esta técnica. Una descripción más detallada de la DNS y LES está fuera de los objetivos de este trabajo, siendo éstas, áreas de intensa investigación actual. (Çengel, 2012)

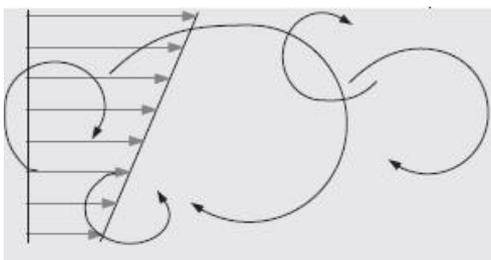


Figura 15. Turbulencia que resuelve la técnica LES. (Çengel, 2012)

El siguiente nivel decreciente en complejidad es modelar todos los remolinos turbulentos no estacionarios con alguna clase de modelo de turbulencia. No se hace ningún intento por resolver las características no estacionarias de los remolinos turbulentos de ninguna escala, ni inclusive los más grandes. Se supone que el modelo de turbulencia considera todos los efectos no estacionarios debido a los remolinos turbulentos en el flujo. La ecuación de Navier-Stokes cuando utilizamos modelos de turbulencia, pasa a ser una ecuación promediada y es conocida como Navier-Stokes de número de Reynolds promedio (RANS), por lo tanto, la ecuación RANS para flujo turbulento, estacionario e incompresible será la siguiente:

$$(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} = \frac{-\nabla P'}{\rho} + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij,turbulento}) \quad (22)$$

Donde el término adicional en el lado derecho de la ecuación justifica las fluctuaciones turbulentas,  $\tau_{ij}$  es un tensor conocido como tensor de esfuerzo específico de Reynolds. La presión ahora la vemos expresada de una manera distinta y esto es simplemente que se está incluyendo en ella el término relativo a la gravedad, dicho término se conoce como presión modificada  $P'$ , hemos de decir que, para flujos sin efectos de superficie libre, el caso del autobús, la gravedad no afecta a la dinámica del flujo. (Çengel, 2012)

El tensor de esfuerzo específico de Reynolds se describe como:

$$\tau_{ij,turbulento} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (22.1)$$

Donde la barra superior indica el promedio en el tiempo del producto de dos componentes de velocidad fluctuantes y los apóstrofes denotan componentes de velocidad

fluctuantes. Puesto que el esfuerzo de Reynolds es simétrico, se introducen a nuestro problema seis incógnitas. Estas incógnitas se resolverán con ayuda del modelo de turbulencia. En la Figura 16, aportamos el concepto gráfico de una variable promediada, como es la velocidad promediada. Donde la velocidad instantánea ( $u$ ) se compone de una velocidad promedio ( $U$ ) o también denotada en la matriz de RANS como ( $\bar{u}$ ) y de una velocidad fluctuante ( $u'$ ), producida por la propia turbulencia.

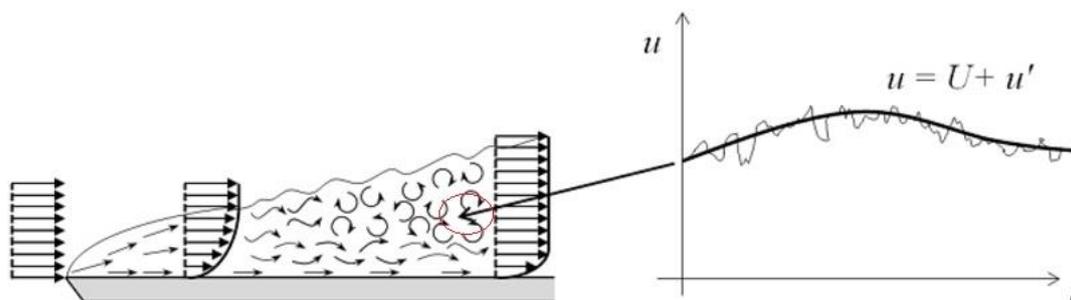


Figura 16. Componentes de la velocidad instantánea en zona turbulencia.

(Blog de Comsol, 2013)

Existen numerosos modelos de turbulencia, entre otros modelos algebraicos, de una ecuación, dos ecuaciones y el del esfuerzo de Reynolds. Estos denominados modelos de turbulencia de dos ecuaciones añaden dos ecuaciones más a la formulación matemática del problema, que deben resolverse de manera simultánea con las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento lineal. Además de emplear estas dos ecuaciones adicionales es necesario especificar otras dos condiciones de frontera para las propiedades de turbulencia en entradas y salidas del dominio fluido, de las que hablamos en la metodología (ver capítulo 4). Por último, antes de empezar a hablar del modelo de turbulencia elegido para resolver nuestro problema quiero hacer una descripción general de algunos de los modelos de turbulencia que nos ofrece nuestro paquete Fluent de CFD, en ANSYS, ordenados de menor a mayor complejidad física.

Tabla 1. Descripción abreviada de los modelos de turbulencia más elementales. (ANSYS, 2013)

Modelo	Descripción	Ventajas	Inconvenientes
Spalart- Allmaras. Modelo de una ecuación.	Diseñado específicamente para aplicaciones aeroespaciales, capas límites con elevados gradientes de presión y turbomáquinas.	Una sola ecuación, con lo que requiere de poca potencia informática. Útil para flujos no muy complejos.	No es muy fiable para modelos de Reynolds altos, aunque puede ser efectivo para primeras medidas con mallados gruesos.
Standard k-ε. Modelo de dos ecuaciones.	Muy usada en la industria. La ecuación de k se saca restando la energía mecánica instantánea de su valor promedio del tiempo, y la ecuación de épsilon a partir de razonamiento físico.	Económica (informáticamente hablando), razonablemente exacta, y se dispone de muchos datos de funcionamiento acumulados en el tiempo.	Resultados mediocres para flujos complejos que implican gradientes de presión severos, fuertes cambios de dirección de las líneas de flujo, remolinos y rotaciones.
RNG k- ε. Modelo de dos ecuaciones.	Es similar al anterior, pero incluye: el término adicional en la ecuación de épsilon que mejora el análisis de flujos rápidos, el efecto del torbellino sobre la turbulencia.	Bueno para problemas moderadamente complejos, como separadores de flujos, flujos arremolinados, y secundarios. Predicciones mejoradas para: fuertes cambios de dirección de las líneas de flujo, flujos de transición.	Sujeto a las limitaciones debidas a la suposición que hace de viscosidad de torbellino isentrópica.
Realizable k- ε. Modelo de dos ecuaciones.	Ofrece los mismos beneficios que el modelo RNG, pero resuelve algunas anomalías en flujos circulares.	Posee los mismos beneficios que el anterior pero además resuelve problemas de flujos circulares.	Tiene prácticamente los mismos inconvenientes que el RNG.
Modelo de esfuerzos de Reynolds, o Reynolds Stress Model.	RSM se obtiene de las ecuaciones de Navier-Stokes hechas un promedio por Reynolds. RSM tiene un alto potencial para predecir con exactitud flujos complejos.	Físicamente es el modelo más completo (empleado en simulaciones de transporte aéreo, y para flujos de elevada turbulencia y complejidad).	Requiere más potencia de CPU, por lo que se hace necesario el empleo de super-ordenadores para realizar problemas medianamente complejos.

### 3.6.1 Modelo de turbulencia Realizable $k - \varepsilon$

Basándonos en la información, que hemos reflejado en la tabla, basada en el manual de ANSYS y en nuestras posibilidades computacionales creemos que el modelo Realizable  $k - \varepsilon$  es el más adecuado para resolver nuestro flujo de fluido. Las ecuaciones de transporte modeladas para el modelo Realizable  $k - \varepsilon$  son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_K \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (24)$$

Donde  $k$  en el modelo representa la energía cinética turbulenta y  $\varepsilon$  es la tasa de disipación turbulenta. Por otro lado, el resto variables y constantes que tenemos son de naturaleza empírica y experimental, y, por lo tanto, vamos a ceñirnos a describirlas de manera superficial, ya que tampoco es objeto profundizar a tal nivel matemático en este modelo de turbulencia. Dicho esto,  $G_k$  es energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad media,  $G_b$  es energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad,  $Y_M$  representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa de disipación global.  $C_2$  y  $C_{1\varepsilon}$  son constantes.  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números turbulentos de Prandtl para  $k$  y  $\varepsilon$  respectivamente y serán constantes también.  $S_k$  y  $S_\varepsilon$  son términos de origen.  $C_1$ ,  $\nu$  y  $S$  son parámetros que dependerán de otros parámetros más complejos del flujo. Por último,  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta, es un parámetro importante porque hace de nexo de unión entre las dos ecuaciones del modelo.  $C_\mu$  es un valor relacionado con la capa límite.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (25)$$

Una vez asentado este entramado matemático, el lector de este trabajo se habrá dado cuenta de que no tenemos valores/datos/información de  $k$  (energía cinética turbulenta) ni de  $\varepsilon$  (tasa de disipación turbulenta) para el flujo que envuelve a nuestro autocar. Por suerte, tenemos un par de variables que están relacionadas con  $k$  y  $\varepsilon$ , y de éstas sí que tenemos un poquito más de información para poder aplicar a nuestro modelo. Estas variables son la intensidad de turbulencia  $I$  (se define como la relación entre la media cuadrática de las fluctuaciones de velocidad y la velocidad media del flujo) y la otra variable es la tasa de viscosidad turbulenta definida como  $\mu_t/\mu$ .

Una intensidad de turbulencia del 1% o menos se considera generalmente baja y las intensidades de turbulencia superiores al 10% se consideran altas. El valor por defecto para la intensidad de la turbulencia es 5% (intensidad media).

La tasa de viscosidad turbulenta es grande (del orden de 100 a 1000) en capas límite de alto número de Reynolds y flujos de conductos completamente desarrollados. Sin embargo, en mayoría de los flujos externos, es bastante pequeño. El valor por defecto para la relación de viscosidad turbulenta se establece en 10. Estos valores que establece el manual de ANSYS por defecto son los que utilizaremos en nuestra simulación. (ANSYS, 2013)

### **3.7 ANÁLISIS DIMENSIONAL Y MODELADO**

Como hemos dicho al principio de este capítulo (acercamiento teórico 3) el análisis dimensional mediante el modelado de un prototipo es una forma más de abordar el problema. A lo largo de este apartado vamos a ir explicando los motivos de su no aplicación práctica a nuestro problema y a la vez iremos redactando la base teórica que será útil o de interés para nuestro problema práctico.

#### **3.7.1 Análisis dimensional y similitud**

La técnica de semejanza o de similitud de modelos, concepto subyacente del análisis dimensional, nos permite predecir el comportamiento de un cuerpo (prototipo) en el seno de un fluido a partir de otro cuerpo (modelo) influenciado por otro o el mismo fluido. Para ello se tienen que guardar unas similitudes o semejanzas entre ambos. Existen tres condiciones necesarias para lograr similitud completa entre un modelo y un prototipo. La primera condición es la similitud geométrica: el modelo debe tener la misma forma que el prototipo, escalado por algún factor de escala constante. La segunda condición es la similitud cinemática, lo que significa que la velocidad en cualquier punto en el flujo del modelo debe ser proporcional (por un factor de escala constante) a la velocidad en el punto correspondiente en el flujo del prototipo. Desde el punto de vista del análisis dimensional, la similitud geométrica se puede considerar como equivalencia en escala de longitud y la similitud cinemática como equivalencia en escala de tiempo. La similitud geométrica es un requisito para la similitud cinemática. Cuando hemos hablado de las líneas de corriente recordemos que pertenecían a la cinemática de fluidos, es decir, las líneas de corriente son fenómenos cinemáticos; por lo tanto, el patrón de líneas de corriente en el flujo del modelo es una copia a escala geométrica de las líneas en el flujo del prototipo cuando se logra la similitud cinemática. La tercera y más restrictiva condición de similitud es la de similitud dinámica. La similitud dinámica se logra cuando todas las fuerzas en el flujo del modelo se escalan por un factor constante a fuerzas correspondientes en el flujo del prototipo. La similitud cinemática es una condición necesaria

pero insuficiente para la similitud dinámica. Por lo tanto, es posible para un flujo de modelo y un flujo de prototipo, lograr tanto similitud geométrica como cinemática, pero no similitud dinámica. (Çengel, 2012)

En consecuencia, esto quiere decir que para que todo esto que estamos contando se cumpla tienen que ser iguales tanto en el modelo como en el prototipo cada uno de los llamados números adimensionales. No quiero entrar, ya que no lo vamos a usar, en los fundamentos o teoremas que rigen la formación o determinación de números adimensionales; nos vamos a conformar con tan solo aplicar los números adimensionales que sean necesarios para nuestro problema.

### **3.7.2 Pruebas experimentales y similitud incompleta**

#### **Similitud incompleta**

El problema es que no siempre es posible empatar todos los números adimensionales de un modelo con los correspondientes del prototipo, inclusive si se ha tenido cuidado en lograr la similitud geométrica. Esta situación se llama similitud incompleta. Por suerte, en algunos casos de similitud incompleta, se tiene la posibilidad de extrapolar las pruebas del modelo para obtener predicciones razonables a escala completa. Sin embargo, cuando igualem un número adimensional del modelo con el número adimensional del prototipo, puede que repercuta en que no podamos a posteriori igualar otro número adimensional por las propias propiedades ya establecidas o que sea inviable llevar a la práctica esa igualación de números adimensionales.

#### **Pruebas en túneles de viento**

Este apartado le vamos a abordar desde un punto de vista práctico para entender de forma clara los motivos por los que no vamos a usar análisis adimensional. Supongamos que quisiéramos medir la fuerza de arrastre de nuestro autobús utilizando un túnel de viento con un modelo a escala, por lo que, diseñamos un modelo geoméricamente semejante al prototipo de autobús que queremos estudiar, cuya escala del autobús modelo sería de un dieciseisavo del autobús real, incluyendo los detalles tales como los espejos, pasos de rueda, tapacubos, cajetín del aire acondicionado... La prueba la queremos hacer a 100 km/h ya es que la velocidad máxima legal permitida para autobuses en territorio nacional. La longitud del autobús real es de 12 metros de largo. La sección del túnel de viento es de 1 metro de alto y de 1.2 metros de ancho, lo suficientemente grande como para acomodar el modelo sin necesidad de preocuparse por la interferencia de las paredes de túnel. El aire en el túnel de viento está a la misma temperatura y presión que el aire que fluye alrededor del prototipo (estas condiciones son fáciles de conseguir).

Por lo tanto, alcanzada la semejanza geométrica, vamos igualar el número de Reynolds (número adimensional) del modelo ( $Re_m$ ) con el del prototipo ( $Re_p$ ) para lograr una semejanza cinemática. El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (26)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido, en nuestro caso será constante (fluido incompresible),  $V$  es la velocidad del fluido,  $L$  es la longitud característica del autobús y  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido (que como quedó demostrado cuando hablamos de las propiedades del fluido es también constante). Igualando los números de Reynolds:

$$Re_m = \frac{\rho_m V_m L_m}{\mu_m} = Re_p = \frac{\rho_p V_p L_p}{\mu_p}$$

De manera, que de esta igualación podemos sacar la velocidad del fluido en el túnel de viento:

$$V_m = V_p \left( \frac{\mu_m}{\mu_p} \right) \left( \frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \left( \frac{L_p}{L_m} \right) = (28 \text{ m/s})(1)(1)(16) = 448 \text{ m/s}$$

Para alcanzar de manera estricta la semejanza cinemática en los puntos del túnel de viento tendríamos que simular el efecto de la carretera, mediante una banda móvil, por ejemplo, cosa que complicaría mucho el hacer el ejercicio. En el siguiente esquema, la Figura 17, se da un ejemplo interesante, pero con un camión en vez de con un autobús.

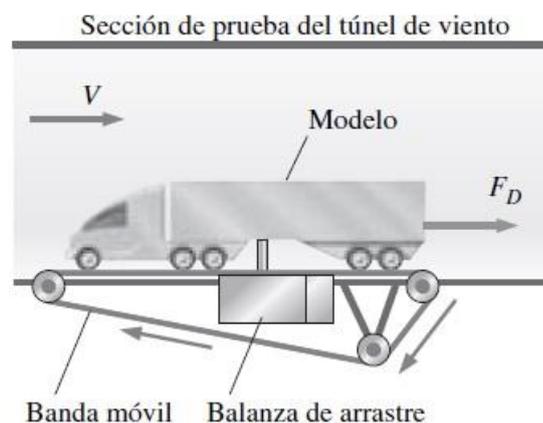


Figura 17. Representación de la banda móvil para lograr semejanza cinemática. (Çengel, 2012)

Entonces, cuando se iguala el número de Reynolds entre modelo y prototipo, el túnel de viento debe correr a 448 m/s (1612.8 km/h). Obviamente, aquí se tiene un problema, porque esta velocidad es prácticamente imposible que la alcancemos en un túnel de viento al que podemos aspirar dentro de nuestras posibilidades y con medios de los que

disponemos. Más aun, incluso si se pudiera correr en el túnel de viento a dicha velocidad, el flujo sería supersónico, dado que la velocidad del sonido en el aire a temperatura ambiente es cercana a 340 m/s. Mientras que el número de Mach del autobús prototipo que se desplaza a través del aire es de  $Ma_p = 28/340 = 0.08$ , el del aire del túnel de viento que corre sobre el modelo sería  $Ma_m = 448/340 = 1.31$  (si el aire en el túnel de viento pudiera fluir así de rápido). Dicho esto, declaramos como imposible empatar el número de Reynolds del modelo con el del prototipo usando este modelo y con este túnel de viento. Naturalmente, podemos hacer algunos apañños para resolver con análisis dimensional.

En primer lugar, si se tuviera un túnel de viento más grande, se podrían hacer pruebas con un modelo más grande. Los fabricantes de camiones y autobuses usualmente prueban con modelos a una escala de un octavo del autobús prototipo, en túneles de viento muy grandes. Algunos túneles de viento son incluso lo suficientemente grandes como para probar automóviles a tamaño real. Sin embargo, mientras más grandes sean el túnel de viento y el modelo, más costosas serán las pruebas. También se debe tener cuidado en que el modelo no sea demasiado grande para el túnel de viento. Una regla empírica útil es que el bloqueo (la razón del área frontal del modelo con el área transversal de la sección de prueba) debe ser menor del 7.5 por ciento. (Çengel, 2012). De otro modo, las paredes del túnel de viento afectarán contrariamente las similitudes tanto geométrica como cinemática.

En segundo lugar, se podría usar un fluido diferente para las pruebas del modelo. Por ejemplo, los túneles de agua pueden lograr números de Reynolds más altos que los que pueden lograr túneles de viento del mismo tamaño, pero son mucho más costosos de construir y operar.

En tercer lugar, podríamos presurizar el túnel de viento y/o ajustar la temperatura del aire para aumentar la capacidad del máximo número de Reynolds. Aunque estas técnicas pueden ayudar, el aumento en el número de Reynolds es limitado, y además no está dentro de nuestras posibilidades presurizaciones relativamente elevadas.

En cuarto y último lugar, si todo esto falla, se puede correr el túnel de viento a diversas velocidades cercanas a la velocidad máxima, y luego extrapolar los resultados al número de Reynolds a tamaño real. Quizás esta última opción sea la más factible de todas, pero sigue escapando de nuestras posibilidades más inmediatas. De esta última opción, vamos a sacar una noción teórica de interés directo con la simulación en CFD con la que hemos resuelto este trabajo, y esta noción es la siguiente que ilustramos en la Figura 18.

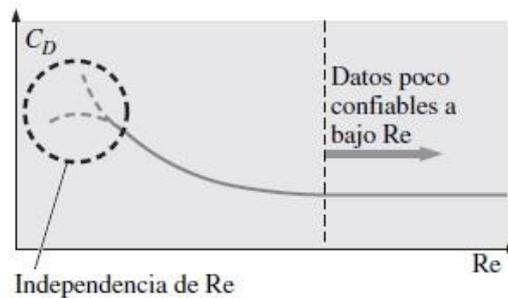


Figura 18. Independencia de  $C_D$  para Reynolds altos. (Çengel, 2012)

El coeficiente de arrastre  $C_D$  (que también será un número adimensional) es función del número de Reynolds para valores bajos de  $Re$ , los  $C_D$  con frecuencia se estabilizan para  $Re$  mayores de cierto valor. En otras palabras, para flujos sobre cuerpos grandes, en especial objetos “exagerados” como autobuses, el flujo es independiente del número de Reynolds a partir de un valor umbral de  $Re$ , esto se debe a que, a partir de ese valor, la capa límite y la estela son ambas totalmente turbulentas.

Otro coeficiente aerodinámico del que vamos a hablar es del de sustentación  $C_L$ , que vamos a explicar en el siguiente apartado.

### 3.8 AERODINÁMICA

Desde el punto de vista aerodinámico, nos interesa conocer los esfuerzos (fuerzas y momentos) que el aire produce en el autobús. Como cabe esperar, la forma del autobús tiene mucha importancia en el comportamiento aerodinámico. Por un lado, diremos que un cuerpo es currentilíneo si se hace un esfuerzo por alinear su forma con las líneas de corriente anticipadas en el flujo. Los cuerpos currentilíneos, parecen perfilados y suaves. Por otro lado, tenemos cuerpos que tienden a bloquear el flujo y les llamaremos romos. Normalmente, es más fácil forzar un cuerpo currentilíneo a través de un fluido que a un cuerpo romo. Nuestra idea no es hacer un diseño aerodinámico, pero si nos interesa que el autobús tienda a ser lo más currentilíneo posible porque eso traerá muchas consecuencias positivas, como minimización del consumo, minimización del ruido y vibraciones y un mejor comportamiento dinámico.

#### 3.8.1 Arrastre y sustentación

Un fluido en movimiento ejerce fuerzas de presión normal a la superficie y fuerzas de corte tangenciales a la superficie debido a la condición de no-deslizamiento provocada por los efectos viscosos. La componente resultante de las fuerzas de presión y de las fuerzas cortantes que actúa en la dirección del flujo se llama fuerza de arrastre ( $F_D$ ), y la componente resultante de las fuerzas de presión y de las fuerzas cortantes que actúa en la perpendicular

del flujo se llama fuerza de sustentación ( $F_L$ ). Éstas son las dos principales fuerzas aerodinámicas en nuestro estudio aerodinámico debido a que nosotros estudiamos la aerodinámica frontal, es decir, el flujo de viento está alineado con el autocar y tenemos simetría en el plano sustentación-arrastre. Si no tuviésemos simetría o estudiásemos viento cruzado aparecería una tercera fuerza, resultante del mismo origen de fuerzas que las otras dos principales, en dirección transversal al autobús que llamaríamos fuerza lateral o transversal ( $F_T$ ), que como digo en nuestro caso cabe esperar que sea prácticamente nula.



Figura 19. Esquema con el centro de presiones del autobús. (Setra reisibus, 2014)

Estas fuerzas actúan sobre el centro de presión o centro aerodinámico del autobús, definido como “el punto en el cual las fuerzas aerodinámicas actúan sobre un cuerpo, y en el cual no hay momento aerodinámico. En terminología mecánica es análogo al centro de gravedad” (Çengel, 2012), de hecho, vamos a ver como su definición matemática es análoga a la del centro de gravedad, pero ojo, no es el centro de gravedad, aunque pueda darse que lleguen a ocupar el mismo punto geométrico. La expresión del centro de presiones ( $C_p$ ) para cada dimensión será:

$$C_{P_x} = \frac{\int p \cdot x \cdot dA}{\int p \cdot dA} \quad (27)$$

$$C_{P_y} = \frac{\int p \cdot y \cdot dA}{\int p \cdot dA} \quad (28)$$

$$C_{P_z} = \frac{\int p \cdot z \cdot dA}{\int p \cdot dA} \quad (29)$$

Si ahora nos trasladamos las fuerzas al centro de gravedad, aparecerán los momentos propios por dichas fuerzas, que será lo que tenemos reflejado en la siguiente Figura 20 :



Figura 20. Esquema de fuerzas y momentos en el centro de gravedad del autobús.

(Setra Reisibus, 2014)

Como no tenemos fuerza lateral debido a la simetría y a que el flujo está alineado con el autobús, la fuerza lateral no contribuye a general ningún tipo de momento, además por el mismo motivo el centro de presiones estará en el plano de simetría, y, por tanto, el momento de balanceo ( $M_B$ ) y de guiñada ( $M_G$ ) serán nulos. En resumen, para nuestro estudio aerodinámico cabe esperar valores de la fuerza de arrastre, fuerza de sustentación y momento de cabeceo ( $M_C$ ). Para determinar estas fuerzas y en consecuencia estos momentos, tenemos que calcular fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación, que una vez resuelto el flujo en cuanto a presión y velocidad con CFD, las calculamos con las siguientes expresiones:

$$F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P \cos \theta + \tau_w \sin \theta) dA \quad (30)$$

$$F_L = \int_A dF_L = - \int_A (P \sin \theta + \tau_w \cos \theta) dA \quad (31)$$

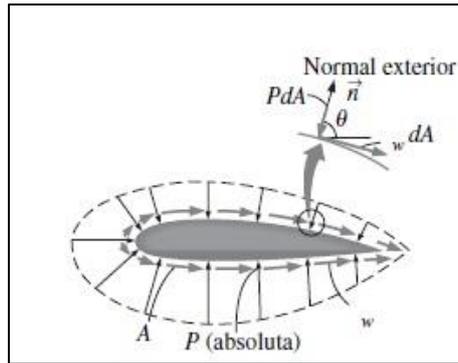


Figura 21. Esquema bidimensional de distribución de presión normal y cortante.

(Çengel, 2012)

En la figura que se adjunta, se puede ver de manera más tangible lo que representan estas expresiones (30) y (31), no obstante, son un tanto simbólicas para nuestro problema ya que son para un flujo bidimensional y el autobús es tridimensional. Las fuerzas de arrastre y sustentación dependen de la densidad  $\rho$  del fluido, la velocidad corriente arriba  $V_\infty$  y el tamaño, forma y orientación del autobús, entre otras cosas, y no es práctico hacer una lista de estas fuerzas para una diversidad de situaciones. En vez de ello, es conveniente trabajar con parámetros adimensionales adecuados que representen las características de arrastre y sustentación del cuerpo. Estos parámetros son el coeficiente de arrastre  $C_D$  y el coeficiente de sustentación  $C_L$ ; se definen como:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A} \quad (32)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A} \quad (33)$$

Donde A es el área frontal del cuerpo (el área que se proyecta sobre un plano normal a la dirección del flujo). Los coeficientes de arrastre y sustentación principalmente son funciones de la forma del cuerpo, pero en algunos casos también dependen del número de Reynolds, como ya vimos en el análisis dimensional, y la rugosidad de la superficie, que en nuestro análisis no lo vamos a tener en cuenta. El término  $\frac{(\rho \cdot V_\infty^2)}{2}$  de las ecuaciones es la presión dinámica.

### 3.8.2 Arrastre debido a fricción y a presión

La parte del arrastre que se debe directamente al esfuerzo de corte de pared  $\tau_w$  se llama arrastre de fricción en la superficie (o arrastre debido a fricción  $F_{D_{Fricción}}$ ), porque lo provocan los efectos de fricción. La parte que se debe directamente a la presión P se llama arrastre debido a presión  $F_{D_{Presión}}$  (también llamada arrastre de forma porque tiene una

enorme dependencia de la forma del cuerpo). Los coeficientes de arrastre debido a fricción y arrastre debido a presión se definen como:  $C_D = C_{D_{Fricción}} + C_{D_{Presión}}$

$$C_{D_{Fricción}} = \frac{F_{D_{Fricción}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot A} \quad (34)$$

$$C_{D_{Presión}} = \frac{F_{D_{Presión}}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_{\infty}^2 \cdot A} \quad (35)$$

El arrastre debido a fricción es una fuerte función de la viscosidad, y aumenta con la viscosidad. El número de Reynolds es inversamente proporcional a la viscosidad del fluido. En consecuencia, la contribución de fricción al arrastre total en cuerpos romos es menor a números de Reynolds altos y puede ser despreciable para números de Reynolds muy altos. El arrastre en estos casos principalmente se debe a la presión. A números de Reynolds bajos se debe más que a todo a la fricción. Éste es el caso para cuerpos currentilíneos, como pueden ser superficies de sustentación. Por otro lado, el coeficiente de arrastre debido a fricción es independiente de la rugosidad de la superficie en flujo laminar, pero tiene una fuerte dependencia en flujo turbulento, debido a los elementos de rugosidad superficiales que sobresalen de la capa límite.

El arrastre debido a presión es proporcional al área frontal y a la diferencia entre la presión en la parte frontal y la parte de atrás del autobús. Entonces, este arrastre es alto para cuerpos que tienden a ser romos, y es pequeño para aquellas geometrías que tienden a ser currentilíneas, por lo tanto, será cero para una superficie paralelas al flujo. El arrastre debido a presión se vuelve más significativo cuando la velocidad del fluido es demasiado alta, llegando entonces el fluido a ser incapaz de seguir la trayectoria curva de la carrocería del autobús y, en consecuencia, el fluido se separa del autobús en algún punto de la parte de atrás produciéndose una zona de presión muy baja. (Çengel, 2012)

### **Reducción del arrastre mediante el diseño aerodinámico**

Una manera intuitiva de reducir el arrastre es hacer un cuerpo más currentilíneo con la finalidad de disminuir la separación del flujo, y, por lo tanto, disminuir el arrastre debido a presión. Pero, este proceso de cambio de forma del cuerpo tiene efectos contrarios sobre los arrastres debido a presión y a fricción. Disminuye el arrastre debido a presión cuando se intenta la no separación de la capa límite y cuando se reduce la diferencia de presión entre el frente del cuerpo y la parte posterior, pero aumenta el arrastre debido a fricción cuando aumenta el área frontal (la anchura del autobús será constante por lo que variaríamos la altura). El resultado final depende del efecto que gane. En consecuencia, en cualquier estudio

de optimización para reducir el arrastre de un cuerpo se deben considerar ambos efectos e intentar minimizar la suma de los dos, como se muestra en la Figura 22.

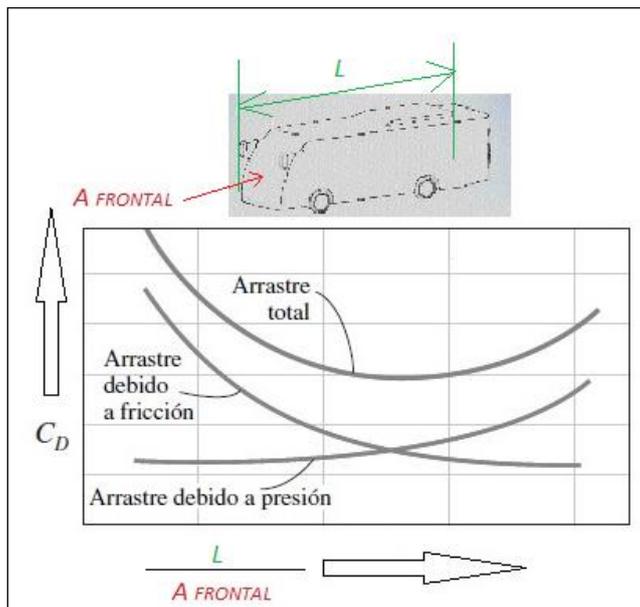


Figura 22. Componentes de arrastre.

En la Figura 22, vemos que la reducción del arrastre para valores “medios” de  $A/L$  se debe principalmente a que la capa límite permanece unida a la superficie más tiempo y a la resultante recuperación de presión. Ojo que el punto mínimo de arrastre total no tiene por qué estar en la intersección del arrastre debido a fricción con el arrastre de presión.

El cambio de la forma del cuerpo a una más aerodinámica tiene el beneficio agregado de reducir la vibración y el ruido. Esto es relativo fundamentalmente para cuerpos romos que están expuestos a flujos de fluidos de alta velocidad, es decir, números de Reynolds altos, para los que la separación de flujo es una posibilidad real. (Çengel, 2012)

## 4 METODOLOGÍA

A rasgos generales, nos vamos a basar en el método de los volúmenes finitos con CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) para resolver este trabajo.

En primer lugar, comenzamos creando la geometría de un autobús, en Autodesk Inventor (Autodesk, 2017), el modelo de autobús creado no es una copia de ningún modelo real. Como se puede ver en la Figura 23, hemos hecho una serie de simplificaciones en cuanto a algunos elementos como faros, defensa delantera y trasera, calandra y parrilla, marcos de puertas y ventanillas, juntas, rejillas y rendijas, limpiaparabrisas y otros elementos que puedan ir por debajo del chasis; la mayoría de estos elementos en autobuses modernos no suponen apenas una sobre-alteración de la superficie que describe la forma del autobús, por ejemplo, los marcos y juntas de ventanilla en los autobuses modernos vienen alineados y alisados con la superficie lateral del autocar. Por otro lado, elementos como limpiaparabrisas requerirían gran esfuerzo en su posterior tarea de mallado, y, además, requerirían invertir mucho tiempo y potencia computacional para después aportar un resultado despreciable al cómputo total comparado con lo que aportan el resto de elementos principales.

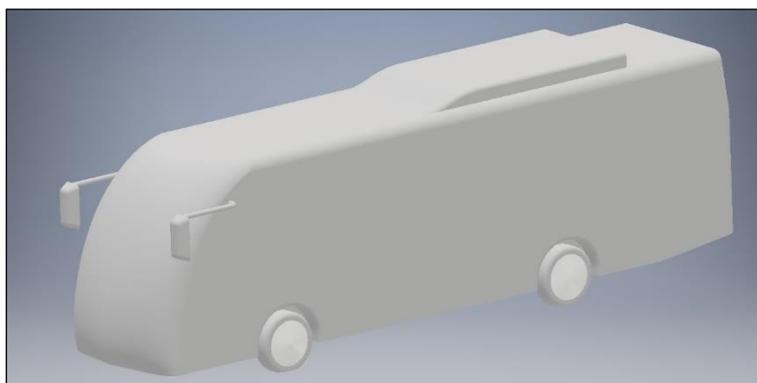


Figura 23. Vista general del modelo diseñado en AUTODESK INVENTOR.

Introducimos a continuación, otras vistas para que el lector se haga una idea completa de la geometría del modelo.

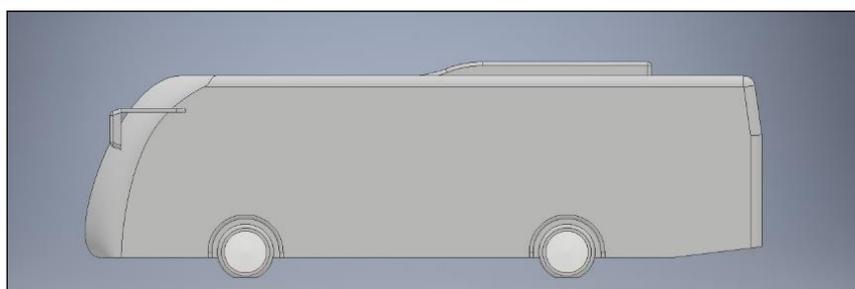


Figura 24. Vista lateral del autobús.

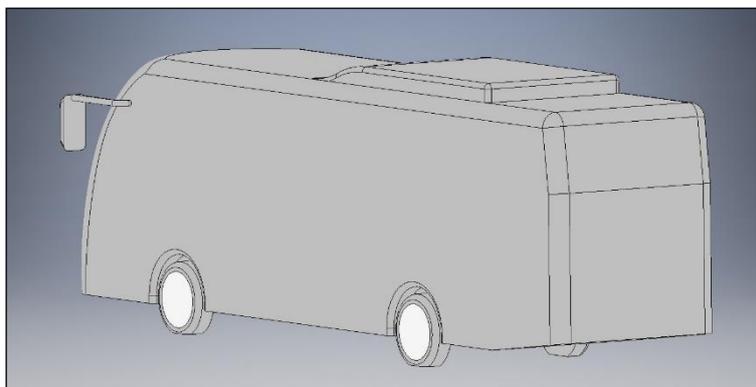


Figura 25. Vista general trasera del autobús.

Observamos, que este modelo creado consta de elementos principales como espejos retrovisores, pasos de rueda y ruedas (en donde por simplicidad consideramos que las ruedas no giran), cajetín del aire acondicionado, rebaje trasero, inclinación superior trasera y los correspondientes redondeos o suavizados en algunas de las aristas de la geometría. Cabe destacar que le hemos querido dotar de una superficie de rodadura en vez de una línea ideal de contacto en las ruedas con la carretera.

A partir de este modelo (que empezaremos a llamarle como modelo 1) creamos otro modelo (modelo 2) con más simplificaciones; como cambiar las ruedas por bloques (zancos prismáticos) y eliminar el cajetín superior del aire acondicionado.

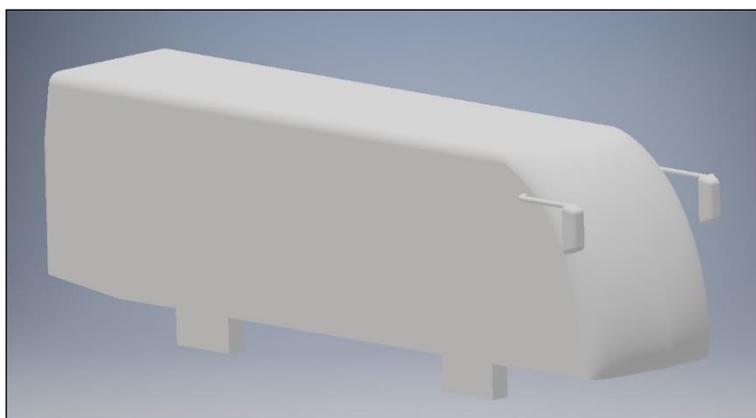


Figura 26. Vista general del modelo 2.

Como en principio no sabemos el peso que tienen en la aerodinámica del autocar los espejos en el modelo 2, hacemos otra simplificación en el modelo 2 y suprimimos los espejos dando origen al nacimiento del modelo 3.

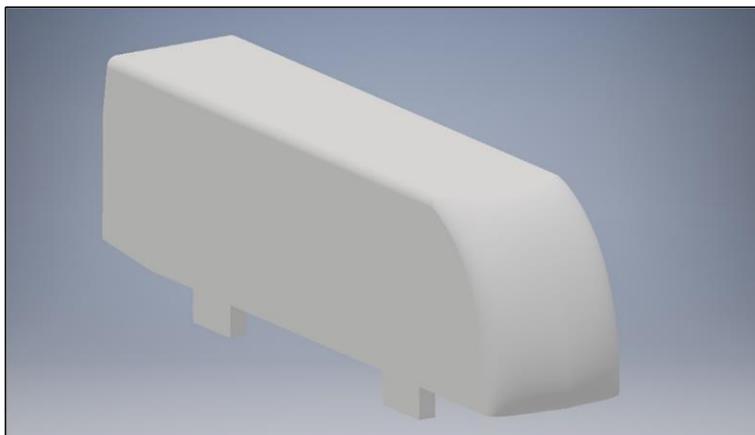


Figura 27. Vista general del modelo 3.

Por último, crearemos un cuarto modelo, el cual tendrá un frontal recto con un redondeo superior y otro inferior en vez de la una superficie frontal compleja, sin rebaje trasero en el chasis, ni inclinación trasera superior, y por supuesto, tampoco gozará de redondeos ni suavizados a lo largo de su geometría. Digamos que es la simplificación más radical posible aplicable a un autobús ya que empieza a convertirse en una geometría primaria tipo prisma.

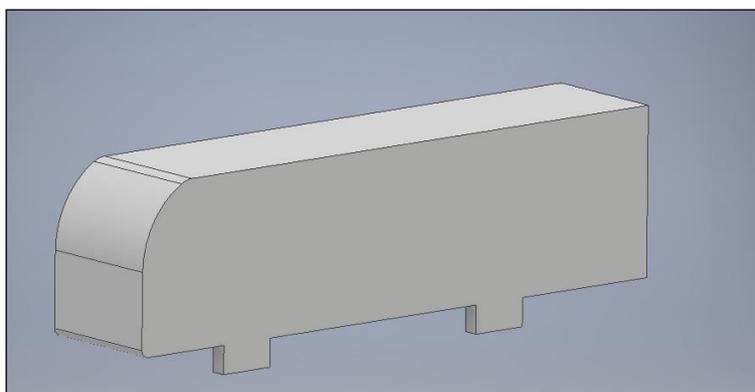


Figura 28. Vista general del modelo 4.

A pesar de las diferencias entre los cuatro modelos, la longitud de largo de los cuatro es la misma que será de 12 metros, que es la longitud estándar en autobuses de dos ejes; tendrán 2,50 metros de ancho, que también es una medida genérica de anchura de autobuses; y además los cuatro tendrán una altura de 3,25 metros en la que no tenemos en cuenta las ruedas ni los zancos en cada uno de los respectivos casos. Naturalmente elementos como espejos retrovisores, el cajetín del aire acondicionado y otros componentes externos cuentan aparte de las cifras de las dimensiones dadas.

En segundo lugar, vamos a crear el dominio computacional para estudiar el flujo de aire alrededor del autobús, para ello generaremos en este dominio computacional una malla de volúmenes finitos o celdas a la que nos referiremos normalmente como elementos finitos. El dominio computacional le entendemos como la región del espacio que estudiamos. La referencia en la que nos basamos para crear el dominio computacional, y así en consecuencia poder crear la malla de volúmenes finitos, es el dominio computacional que se usa en el Ahmed Body (Comsol, 2015), que es un caso de análisis aerodinámico en un vehículo con geometría simplificada. El dominio computacional de Ahmed Body tiene de ancho y de alto, el doble de la longitud de largo del vehículo, y de profundidad, que será la dimensión en la dirección del flujo tendrá unas ocho veces la longitud del cuerpo. El cuerpo se encuentra centrado y posado sobre la base del dominio computacional y la parte delantera se sitúa al doble de la longitud de largo con respecto a la entrada del volumen computacional. A tenor de estas referencias, creamos nuestro volumen computacional con aproximadamente las mismas dimensiones y referencias. Para crear este volumen dimensional, haremos una operación de diferencia entre la geometría sólida de nuestro autobús y un prisma con las dimensiones habladas resultando un prisma con un hueco interno que pertenece a la forma del autobús. Esta operación la haremos para cada uno de los cuatro modelos que hemos diseñado. Nosotros la hemos construido en Autodesk Inventor y ya desde ahí exportamos en formato (.sat) a ANSYS (ANSYS, 2017). Por simplicidad, para no estar hablando de los cuatro modelos todo el rato en los cuales vamos a hacer las mismas operaciones voy a centrar mi atención al modelo 1 para explicar la metodología.

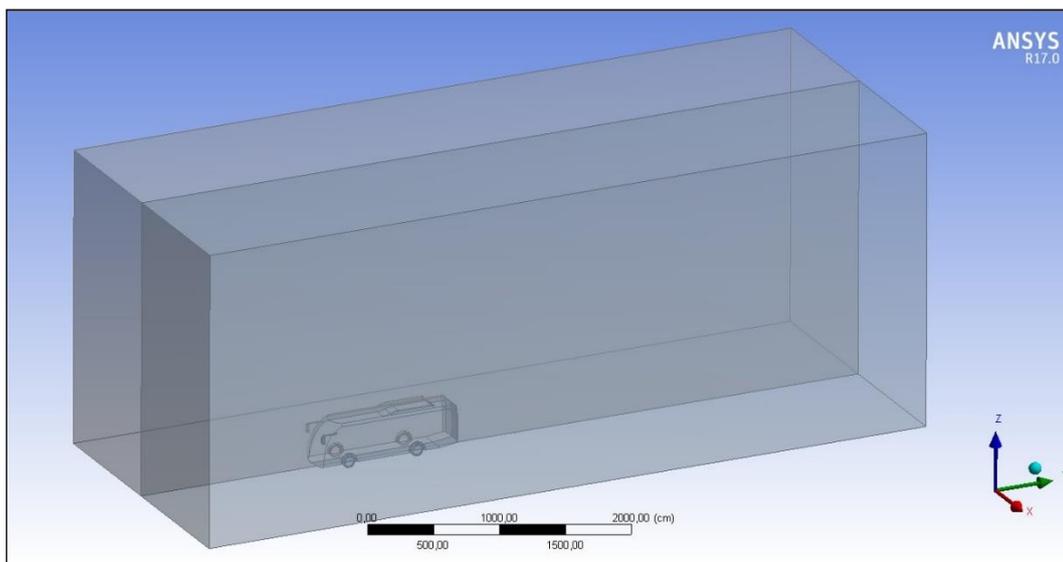


Figura 29. Dominio computacional del modelo 1.

Después, hemos hecho una serie de selecciones de superficies (superficies interiores con las formas de las distintas partes del autobús y caras exteriores) en el dominio computacional para que más adelante sea trivial aplicar condiciones de contorno. Dicho esto,

podemos empezar a hablar de la malla. Valorando las características de los softwares de los que disponemos para resolver el problema, decidimos que ANSYS se ajustaba mejor que COMSOL a los condicionantes del problema, por lo que a partir de ahí optamos por crearla en ANSYS. Hicimos algunos test de mallado para nuestras geometrías y decidimos finalmente, estando limitados por motivos que se explican en el alcance (apartado 1.4), hacer un mallado fino estándar; nuestra malla tendrá una densidad de elemento variable; una función de tamaño con proximidad y curvatura; también estará caracterizada por una transición suave; y hemos introducido en las inmediaciones de la superficie del autobús unas capas de elementos cuya forma es tipo prisma cuadrático (“boundary layers”) siendo el objetivo de estas capas el capturar de manera más precisa la capa límite y los efectos en la misma. Estas capas finas también las hemos incorporado sobre el plano de la carretera por la que circularía el autobús.

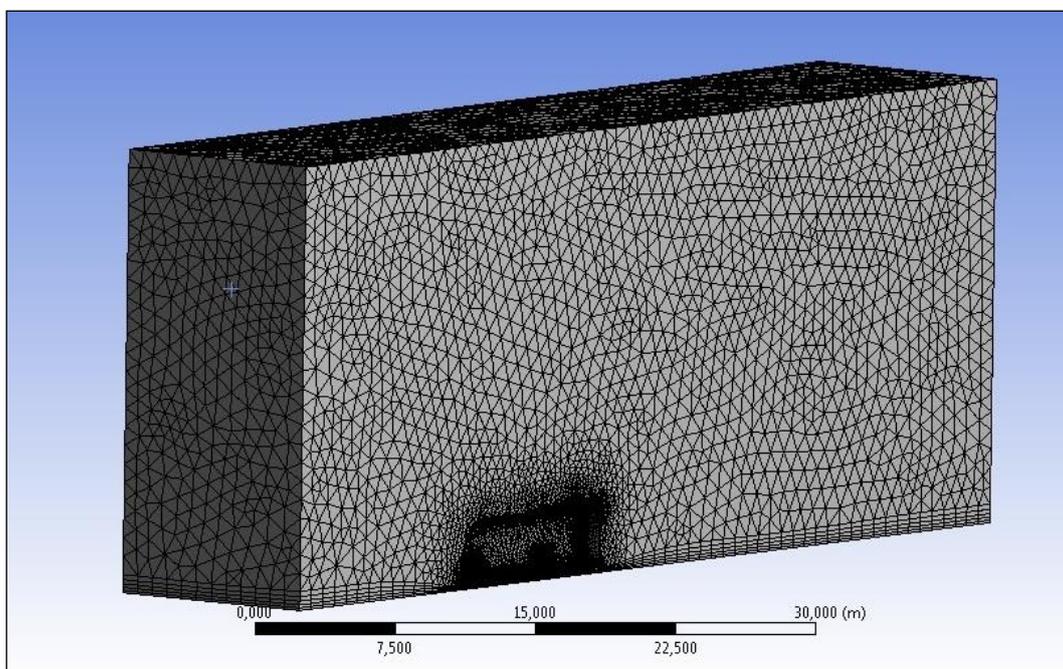


Figura 30. Corte en mitad de la malla.

Introducimos Figura 31 y Figura 32 para ver con detalle la malla generada.

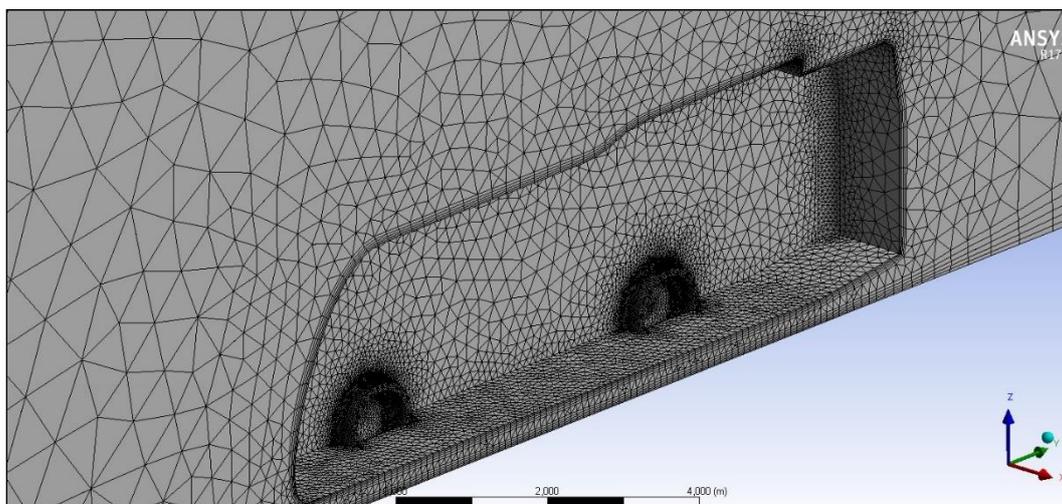


Figura 31. Detalle del corte en la malla.

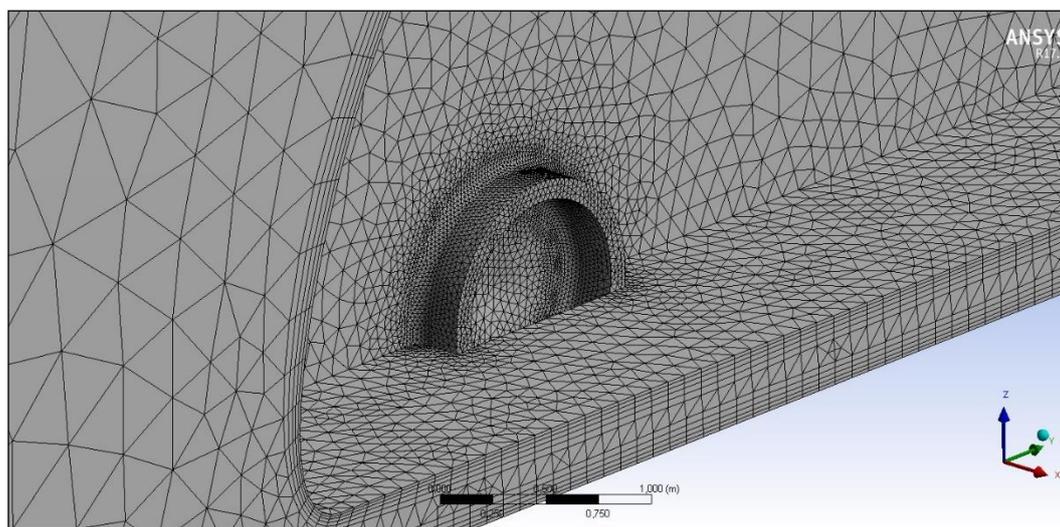


Figura 32. Detalle 2 del corte en la malla.

En la Figura 32, se aprecia de manera clara las “boundary layers” alrededor del autobús y sobre la carretera, también se ve con un poquito más de claridad las zonas donde se concentran muchos elementos como en los pasos de rueda. Ni que decir tiene que esto mismo lo hacemos para los otros tres modelos restantes.

En tercer lugar, llega el momento de conceder las propiedades materiales del aire (ver propiedades del aire en apartado 3.2) al dominio computacional creado. ANSYS para el caso del aire y algunos otros fluidos elementales tiene ya por defecto introducidas las propiedades básicas de los mismos. Trabajamos por tanto con una densidad de  $1.225 \text{ kg/m}^3$  a presión atmosférica y a  $288 \text{ K}$ ; y una viscosidad de  $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

En cuarto lugar, tenemos que asignar a cada cara o superficie del autobús las llamadas condiciones de contorno o condiciones frontera. Para ello recuperamos las selecciones que

hicimos en segundo lugar y las dotamos de condiciones. A las superficies interiores que definen la silueta o la forma del autobús (Wall) las dotamos con la condición de no deslizamiento (ver teoría de no deslizamiento 3.1.2).

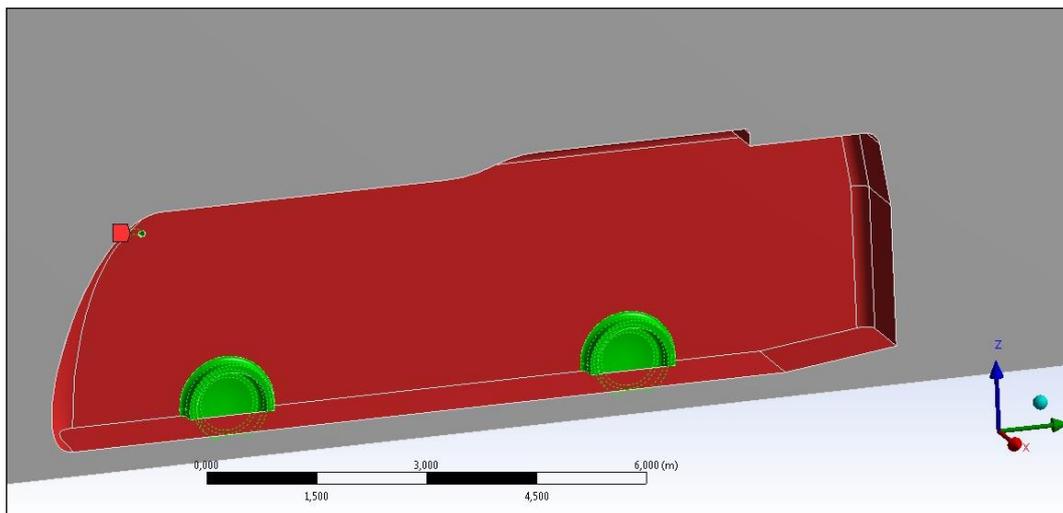


Figura 33. Corte simétrico; selección de las caras y superficies interiores.

A la base del dominio (Ground) que simula el efecto de la carretera la aplicaremos también la condición de no deslizamiento pero la dotaremos de movimiento en la dirección del flujo, ya que nosotros, pretendemos simular el comportamiento de un autobús en movimiento, es decir, en tal situación el autobús se movería sobre el aire y sobre la carretera y según el movimiento relativo equivale a que la carretera y el aire se muevan sobre el autobús estando este en reposo, por lo tanto, tendremos que dotar a la carretera de la velocidad a la que va el autobús. Las simulaciones las hacemos a 100 km/h que viene ser aproximadamente 28 m/s.

Por otro lado, aplicamos en la entrada al dominio (Inlet) la condición de velocidad de entrada, en la que ponemos la velocidad a la que va el autobús sobre el aire o lo que es lo mismo la velocidad a la que va el aire respecto al autobús (100 km/h) que además en los cuatro casos de modelo hemos supuesto condiciones adversas de viento de unos 40 km/h (ver apartado 3) por lo que la velocidad resultante de entrada a nuestro dominio será de unos 140 km/h que lo dejamos por redondeo numérico en cuanto a unidades de pasar de km/h a m/s en 40 m/s. Por decirlo más claro, tenemos en cuenta el aire relativo a la velocidad del autobús más el viento debido a unas posibles condiciones adversas. La salida del dominio computacional (outlet) estará sujeta a la condición de presión atmosférica en todos sus puntos. Tanto para el caso de la entrada (inlet) como para el de la salida (outlet) tenemos que definir los valores  $k$  (energía cinética turbulenta) y  $\epsilon$  (tasa de disipación de energía turbulenta). (Ver teoría  $k$ - $\epsilon$  en apartado 3.6.1) Tomamos el valor de intensidad de la turbulencia de un 5% y el de la tasa de viscosidad turbulenta que se establece en 10.

Por último, nos queda por hablar de las caras que envuelven al dominio computacional (exterior), que estará definido por tres caras exteriores donde reinará la condición de deslizamiento ya que estas caras pretenden poner coto al dominio de estudio, pero en ningún caso producir efectos en él, digamos que son paredes tipo ideal, las cuales pretenden representar que al otro lado de ellas habría fluido con las mismas propiedades y condiciones que las que hay por el lado cargado de flujo.

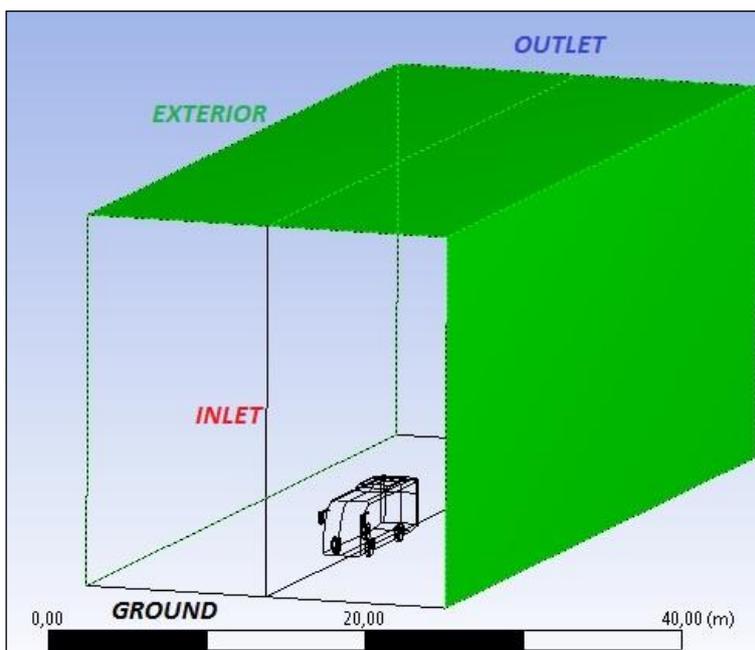


Figura 34. Dominio computacional en donde vemos las distintas condiciones de contorno.

En quinto lugar, completados ya los pasos anteriores, nos faltaría resolver matemáticamente el problema, es decir, aplicar a cada celda, que la podemos considerar como un volumen de control, las ecuaciones de conservación y de transporte (ver ecuaciones (17), (22), (23) y (24)); como resolvemos con FLUENT, se aplicará el método de volumen finito centrado en la celda y posteriormente, una vez resuelto, hará una interpolación entre los centros de cada celda para tener valores a lo largo del volumen finito. No vamos a entrar a describir los algoritmos de discretización matemática de las ecuaciones aplicadas ni en las características del resolovedor matemático que se emplea porque escapa de los objetivos del trabajo. No obstante, tendremos que llevar algún tipo de control matemático o referencia matemática sobre el proceso de resolución, pues bien, esto lo vamos a hacer monitorizando los residuos de las ecuaciones de conservación y transporte, y también, un par de coeficientes adicionales. Antes de comenzar las iteraciones del proceso para resolver las ecuaciones diferenciales, FLUENT hace unas primeras “sub-iteraciones” para acercarse al valor con el que empezará a iterar a uno más cercano a la posible solución final. Dicho esto, empiezan las iteraciones de las ecuaciones discretizadas de conservación y transporte aplicadas al centro

de cada celda. Si se trasladaran todos los términos de cada ecuación a un lado para obtener cero en el otro lado de la ecuación, entonces la solución numérica sería “exacta” cuando la suma de esos términos, llamada residuo, se volvería cero para cada celda del dominio sustituyendo los valores obtenidos de una iteración. Digamos que un residuo puede considerarse como una medida de la desviación de una solución numérica respecto a la solución exacta. (Çengel, 2012). Obviamente, en CFD nunca va a ser cero, pero es de esperar que disminuya conforme avanzan las iteraciones. Suponiendo una malla adecuada a la geometría y una configuración del resolovedor matemático también adecuada (aquí ya he dicho que no vamos a entrar) graficamos las iteraciones con la esperanza de hacer disminuir estos residuos. En la Figura 35, se da la muestra práctica de lo que estamos hablando aplicado en el modelo 1.

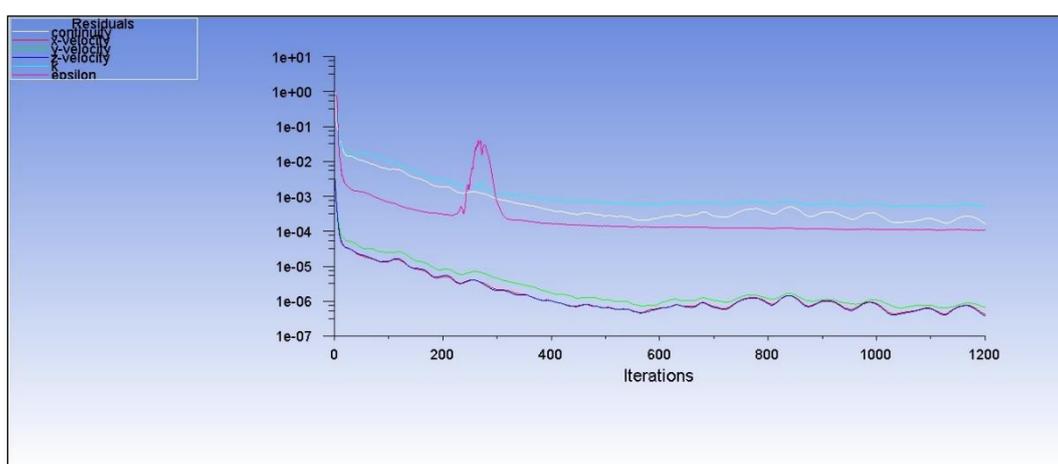


Figura 35. Los residuos para cada una de las iteraciones de las ecuaciones de conservación y de transporte.

Puede que el lector se esté dando cuenta de que, aunque con la gráfica disminuyen los residuos, no tenemos suficiente información para declarar la convergencia de la solución. Por eso recurrimos a monitorizar el coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación con respecto a cada iteración, de manera que cuando al cabo de unas cuantas iteraciones el valor de los coeficientes no varíe, es decir, se estabilice, declaremos la convergencia de la solución en nuestro modelo, eso sí, teniendo en cuenta simultáneamente que los residuos sean considerablemente bajos, en la Figura 35, vemos que los residuos de velocidad en x, velocidad en y, velocidad en z, son más bajos que los residuos de la ecuación de continuidad y de las ecuaciones de transporte, a los cuales les cuesta bajar porque las ecuaciones de transporte son las encargadas de resolver la turbulencia y la turbulencia (como se ve en apartado 3.6) es un fenómeno muy complejo de resolver. Los valores de la Figura 36 y Figura 37 están calculados a partir de los valores que devuelven las ecuaciones de conservación y transporte para esa iteración.

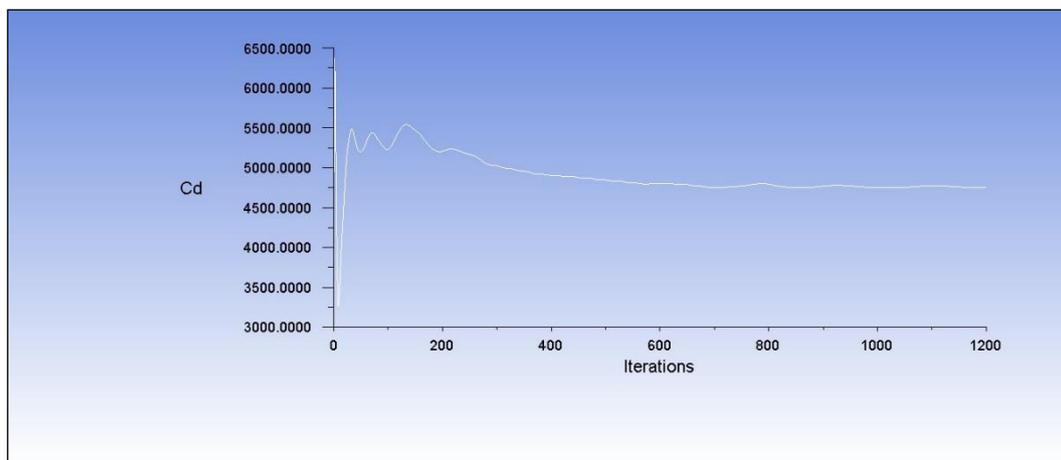


Figura 36. Coeficiente de arrastre para cada iteración.

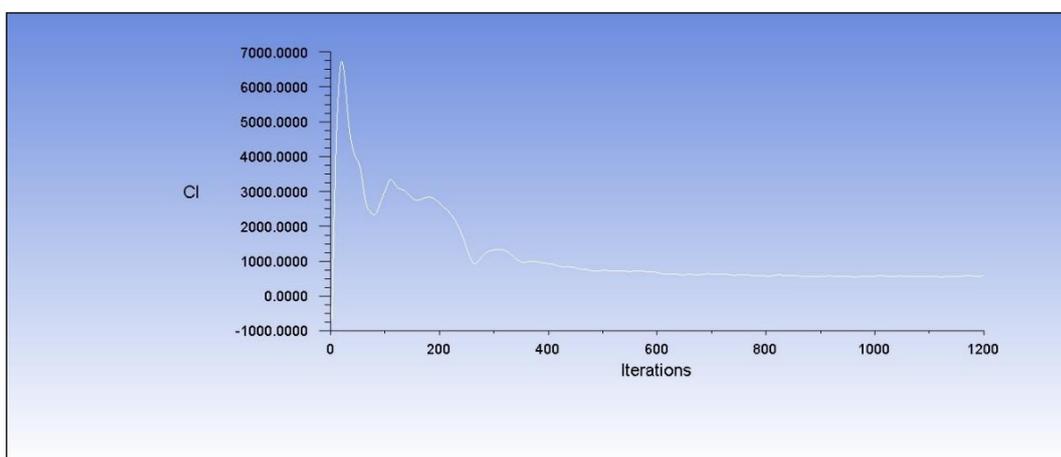


Figura 37. Coeficiente de sustentación para cada iteración.

En la Figura 36 y Figura 37, a partir aproximadamente de la iteración número 800 vemos una estabilización de los coeficientes  $C_D$  y  $C_L$ . Por lo que, según lo dicho, consideremos la convergencia del modelo 1.

A partir de aquí, tendríamos valores en todas las celdas del dominio en cuanto a velocidad (velocidad en x, velocidad en y, velocidad en z) y a presión, por su puesto ya complementados con los efectos de turbulencia que han tenido en cuenta las ecuaciones de transporte. Ni que decir tiene que hacemos lo mismo con los tres modelos simplificados restantes. Finalmente, les sometemos a examen para ver si podemos continuar el análisis aerodinámico con alguno de los modelos simplificados, por simplicidad (tiempo y recursos computacionales), en vez de con el modelo detallado (modelo 1). (Ir a análisis de resultados 5.1)

Analizados los resultados del primer estudio aerodinámico a los que hemos sometido a los cuatro modelos, hemos concluido que el modelo 2, que carece de cajetín de aire acondicionado y de pasos de ruedas con sus respectivas ruedas, es una simplificación apta con respecto al modelo 1 para continuar con más estudios aerodinámicos. Por lo tanto,

centramos nuestra atención en el modelo 2 y le sometemos a diferentes condiciones de viento frontal, y a partir de ahí, sacaremos valores e información gráfica de su comportamiento en dichas condiciones de viento. Finalmente, calcularemos el esfuerzo de momento de cabeceo a partir de la determinación del centro aerodinámico y de una estimación de la posición centro de gravedad del autobús. Lógicamente, el centro de gravedad del autobús real con la geometría que hemos modelado no es el centro de gravedad del autobús modelado, es decir, un autobús tiene espacios vacíos en su interior como pueden ser los huecos de los maleteros, los huecos del habitáculo interior de los pasajeros, el motor colocado en la parte de atrás, etc., lo que desemboca, en una distribución no uniforme de masa, y en consecuencia, una localización distinta del centro de gravedad con respecto a nuestro modelo relleno de material homogéneo. Para dar una estimación del centro de gravedad nos hemos basado en (Olana, 2011).

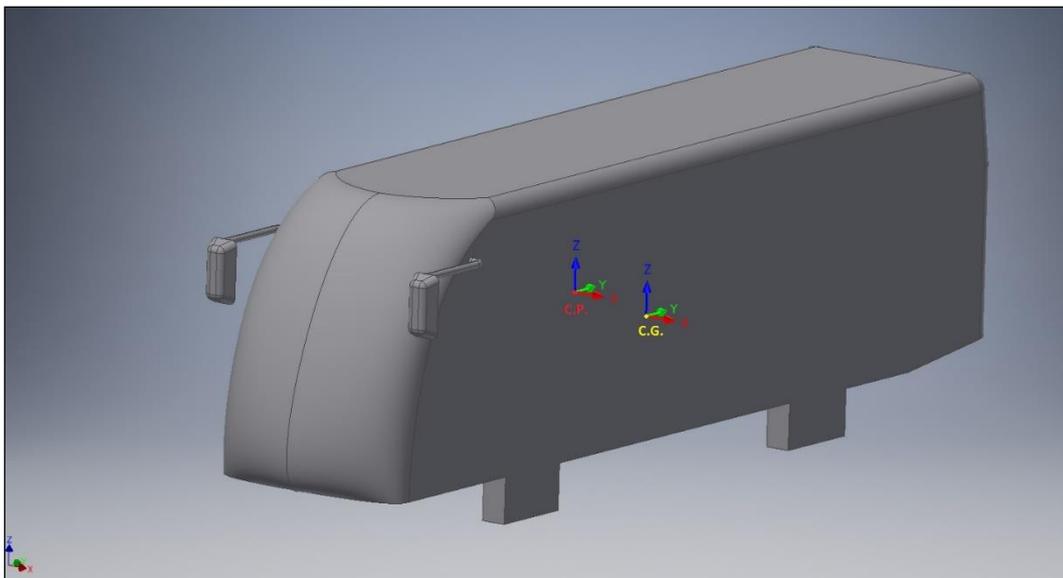


Figura 38. Vista general con el centro de gravedad (amarillo) y centro aerodinámico (rojo).

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 ESTUDIO AERODINÁMICO GENÉRICO DE LOS MODELOS

Los datos con los que trabajaremos en este capítulo de análisis de resultados son datos de post-procesado, es decir, a partir de los datos de las variables elementales obtenidas del proceso de iteración, se obtienen post-procesándolas los resultados que daremos de aquí en adelante.

Realizamos un primer estudio aerodinámico sobre los cuatro modelos de los que disponemos. Como hemos dicho, se hará un estudio del comportamiento de los modelos a una velocidad de 100 km/h suponiendo un viento frontal en contra de unos 40 km/h, es decir, que redondeando a favor de la seguridad lo dejamos en 40 m/s (144 km/h). Redondeamos por exceso porque siempre será mejor tener conocimiento del comportamiento en condiciones adversas o peligrosas de viento para tener una cierta tranquilidad en cuanto a la seguridad del autobús en caso de que se pudiera por algún motivo acercarse a estas circunstancias. Por lo tanto, la siguiente tabla nos da los valores propios de cada modelo:

Tabla 2. Tabla de resultado del primer análisis. Fuerza en (N) y de área en (m<sup>2</sup>)

MODELO	F <sub>D,presión</sub>	F <sub>D,fricción</sub>	F <sub>D</sub>	F <sub>L,presión</sub>	F <sub>L,fricción</sub>	F <sub>L</sub>	Área FRONTAL	C <sub>D</sub>	C <sub>L</sub>
<b>Modelo 1</b>	<b>2549.09</b>	<b>364.25</b>	<b>2913.35</b>	<b>347.93</b>	<b>7.33</b>	<b>355.26</b>	<b>9.3192</b>	<b>0.318</b>	<b>0.038</b>
<b>Modelo 2</b>	<b>2615.65</b>	<b>351.82</b>	<b>2967.47</b>	<b>-89.16</b>	<b>2.72</b>	<b>-86.43</b>	<b>8.9138</b>	<b>0.339</b>	<b>-0.009</b>
Modelo 3	2080.28	341.08	2421.37	-630.67	5.33	-625.67	8.4385	0.292	-0.075
Modelo 4	5319.84	237.82	5557.66	-740.89	11.98	-728.91	8.4550	0.670	-0.087

La densidad del aire a 15° C (288 K) y a presión atmosférica es de 1.225 kg/m<sup>3</sup> y su viscosidad de 1.7894· 10<sup>-5</sup> Pa·s, siendo estas las propiedades del aire en el seno del autobús a las que se ha hecho la simulación.

Hemos tenido en cuenta la fuerza de arrastre (30) y la fuerza de sustentación (31) porque son los dos parámetros más importantes en un estudio aerodinámico, tanto ellas como sus respectivos coeficientes C<sub>D</sub> y C<sub>L</sub>. (Ver coeficientes aerodinámicos (32) y (33) en el apartado 3.8.1)

Observando los resultados, vemos que, en cuanto a fuerza de arrastre, el modelo 1 y el modelo 2 no difieren de manera considerable, ya que en el orden de magnitud en el que nos estamos moviendo, 54.12 N de diferencia es un valor que a sus efectos podemos despreciar. Lo mismo sucede con el correspondiente coeficiente C<sub>D</sub> del modelo 1 y del modelo

2. Si estuviéramos estudiando la aerodinámica de un vehículo deportivo o de competición estas decimas serían motivo de mucha diferencia y para nada despreciables, pero no es el caso de un autobús. Sin embargo, la fuerza de sustentación del modelo 1 con respecto al modelo 2 no solo se diferencia en un valor aproximado de unos 450 N sino que en el modelo 1 tenemos una sustentación positiva (el efecto aerodinámico tendería a levantar el autobús) y en el modelo 2 presenciamos sustentación negativa (el efecto aerodinámico tendería a agachar el autocar), para tomar una decisión al respecto sobre cómo interpretar la cuantía e importancia de estas fuerzas de sustentación, hemos de apoyarnos en el peso del autobús. La fuerza peso de un autocar con las mismas características dimensionales que tienen nuestros modelos, oscila entre 12000 N y 14000 N, como sabemos esta fuerza actúa en la dirección de la sustentación y es enormemente superior a la fuerza de sustentación tanto del modelo 1 como del modelo 2, por lo tanto, terminamos diciendo que tanto la fuerza de sustentación del modelo 1 como la fuerza de sustentación del modelo 2 son despreciables en los dos casos aunque entre ellas haya una diferencia un tanto considerable. Por otro lado, tanto el modelo 3 y sobremanera el modelo 4 se escapan de la cercanía del modelo 1, si es verdad que la sustentación y los coeficientes aerodinámicos en el modelo 3 no distan mucho del modelo 1, pero la fuerza de arrastre del modelo 3 dista unos 500 N aproximadamente y eso es un valor importante; el modelo 4 sirve más que nada para reflexionar acerca de lo que repercute en el comportamiento un diseño aerodinámico en comparación con uno autobús como.

En conclusión, podemos afirmar que el modelo 2 es una buena aproximación al modelo 1 en tales condiciones, por lo que el cajetín del aire acondicionado y los pasos de rueda correspondientes al modelo 1 consideremos que no afectan a la fuerza de arrastre y no es importante a los efectos de sustentación por los motivos recién explicados.

Para cerrar este primer análisis aerodinámico vamos a ver si encontramos en las líneas de corriente del modelo 1 y del modelo 2 alguna explicación que refuerce o respalde las ideas adoptadas hasta el momento. Pues bien, trazamos el plano de simetría (plano YZ según nuestro sistema de coordenadas) que rebana al modelo 1 y al modelo 2, y calculamos con FLUENT las líneas de corriente contenidas en estos planos.

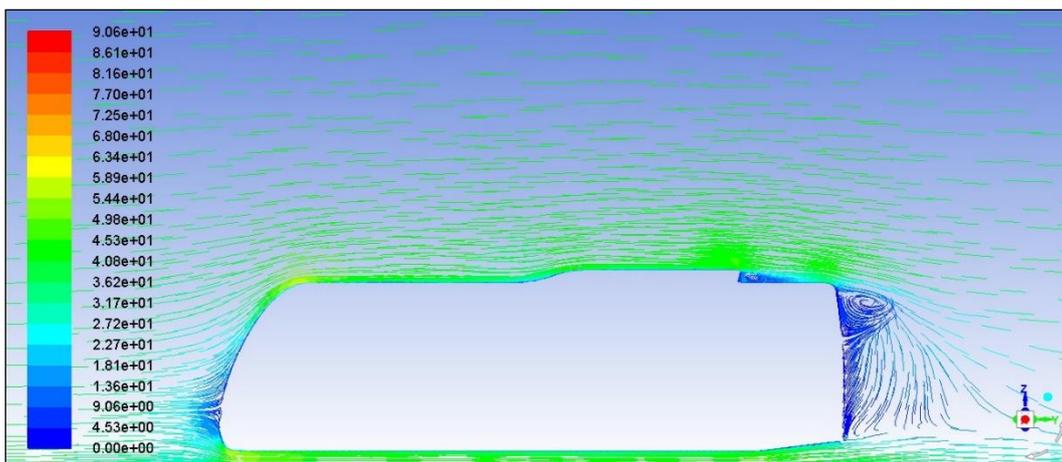


Figura 39. Líneas de corriente en plano YZ del modelo 1. Color representa velocidad (m/s).

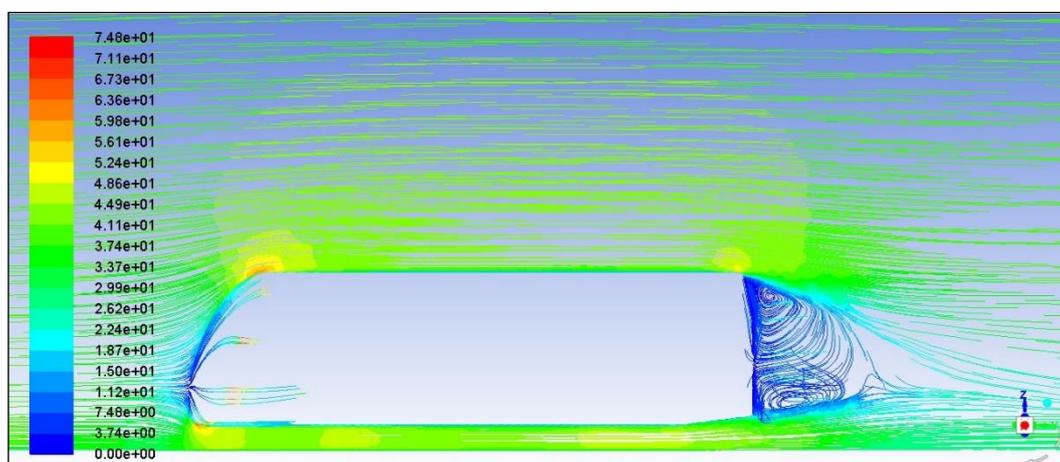


Figura 40. Líneas de corriente en plano YZ del modelo 2. Color representa velocidad (m/s).

El interpretar y sacar conclusiones a raíz de las líneas de corriente puede llegar a ser tarea compleja. En este caso, (no se todavía que pasará a medida que avancemos en el estudio) tenemos una claridad en el trazado de las mismas que nos van a permitir sacar algunas ideas.

A rasgos generales, en el modelo 1 se produce una turbulencia en la parte superior trasera queriéndose tender a formar otra segunda inmediatamente debajo, que en el caso del modelo 2 este segundo vórtice trasero se forma sin ningún temor siendo este un aliciente importante en la diferencia de sustentación que se producía entre el modelo 1 y el modelo 2. Este remolino de aire colabora en conferir sustentación negativa al modelo 2 mientras que su cese colabora a que no se produzca como vemos en el modelo 1, pero, además, en el modelo 1 hay otro vórtice elemental que añade sustentación positiva, es el que se produce en la parte trasera del cajetín del aire acondicionado, que como vemos en la Figura 41, es el típico caso de la separación del flujo. (Ver teoría de condición de no deslizamiento y capa límite; apartado 3.1.2)

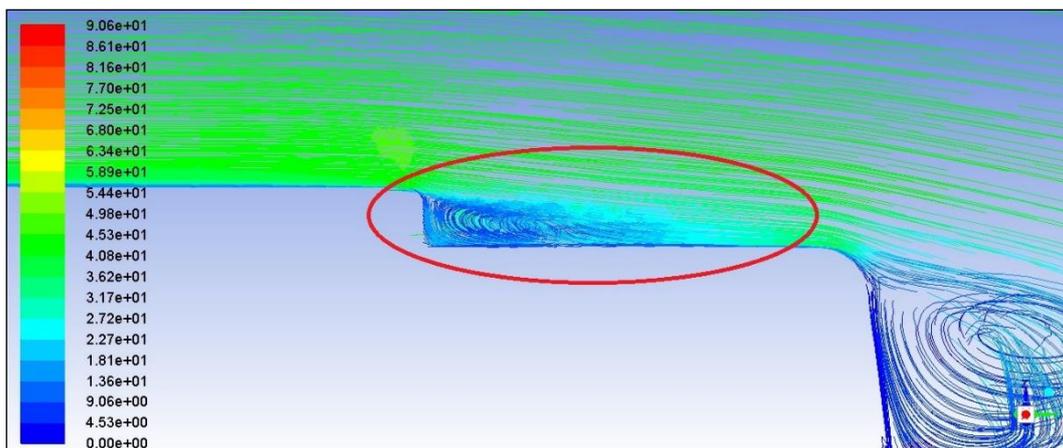


Figura 41. Separación de flujo en la trasera del cajetín del aire acondicionado (modelo 1).

Por otro lado, observamos que especialmente en el modelo 2 más que en el modelo 1 en la zona de abajo, es decir, entre el chasis y la carretera aumenta de manera relativa la velocidad del flujo a una cierta distancia de las superficies, es decir, el flujo acelera en estas zonas, que están relativamente separadas de la superficie del autobús y de la carretera, en las que no reina especialmente la rotacionalidad ni la vorticidad, por lo que nos podemos apoyar en el principio de Bernoulli (apartado 3.4) para justificar porque en esta zona disminuirá la presión tal y como vemos en la Figura 42 .

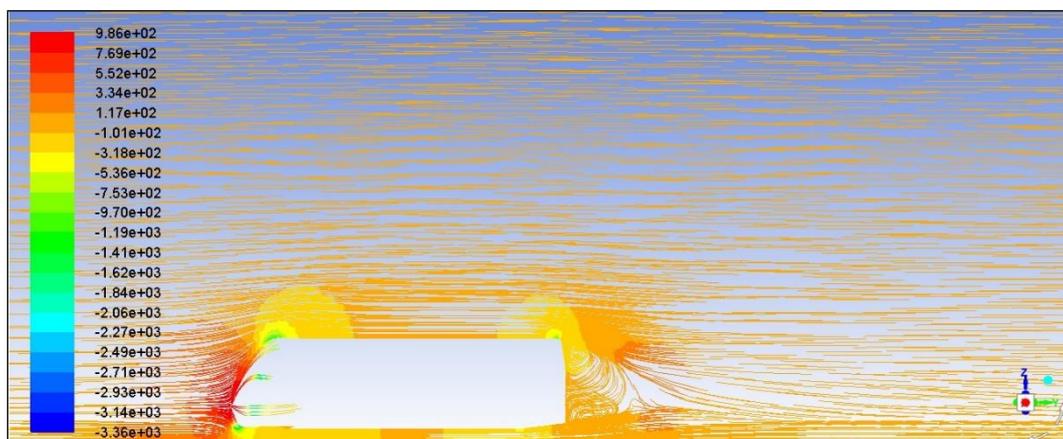


Figura 42. Líneas de corriente en plano YZ del modelo 2. Color representa presión (Pa).

En la Figura 42, vemos como en la zona de la que estamos hablando, la presión representada con el color de las líneas de corriente decrece ya que tiende a ponerse de color amarillo, es decir, oscila en un rango de entre -101 pascales y -318 pascales en la mayoría de la zona señalada. Aportamos la Figura 43 para una mayor aclaración visual de estas presiones.

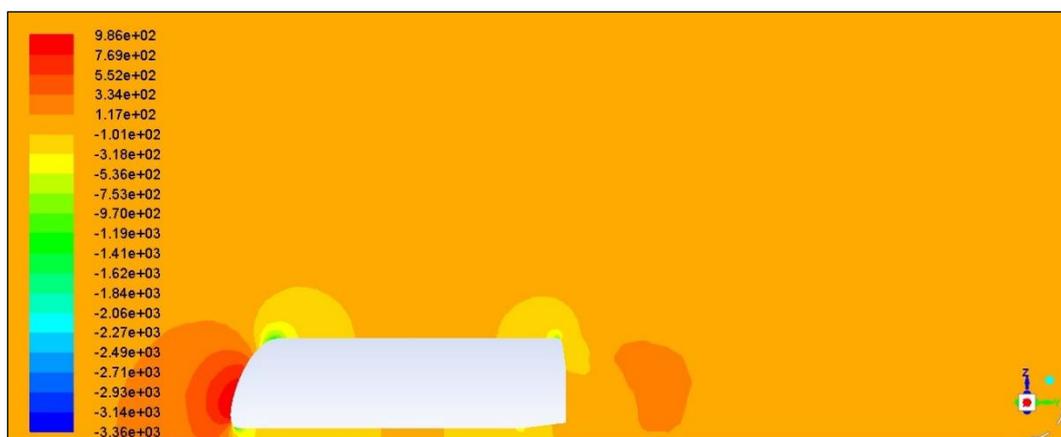


Figura 43. Gráfica de contorno en plano YZ del modelo 2. Representación de presión (Pa).

Además, en la Figura 43, quizás se vea mejor que la presión en la parte de adelante del autobús (en el frontal) es más alta que en el resto del campo de flujo. Por si el lector no lo había intuido, estamos representando la presión estática.

Hasta ahora, hemos trabajado con perfiles de corriente y gráficas de contorno contenidos en el plano central del autobús (YZ) pero ahora vamos a estudiar que pasa en el seno de las ruedas (para el modelo 1) o bloques (para el modelo 2). Para ello hacemos un plano vertical que pase por el centro de las ruedas y rebane al autobús de la misma manera que antes. Dicho lo cual, obtenemos la Figura 44 relativa al modelo 1 y la Figura 45 relativa el modelo 2. Apreciamos en la Figura 44 y en la Figura 45 que al alejarnos del plano de simetría (YZ) del autobús comenzamos a tener dificultades para contener las líneas de corriente en el nuevo plano vertical. La explicación está en que las líneas de corriente fluyen a lo largo del espacio para un flujo tridimensional y no tienen por qué permanecer alojadas en un plano que nosotros hagamos para estudiar el flujo.

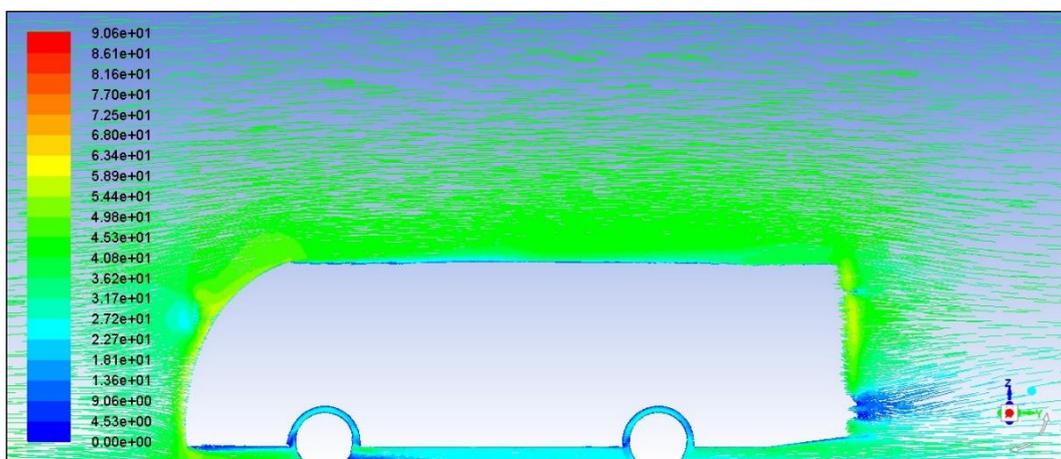


Figura 44. Líneas de corriente en plano paralelo al YZ. Color representa velocidad (m/s).

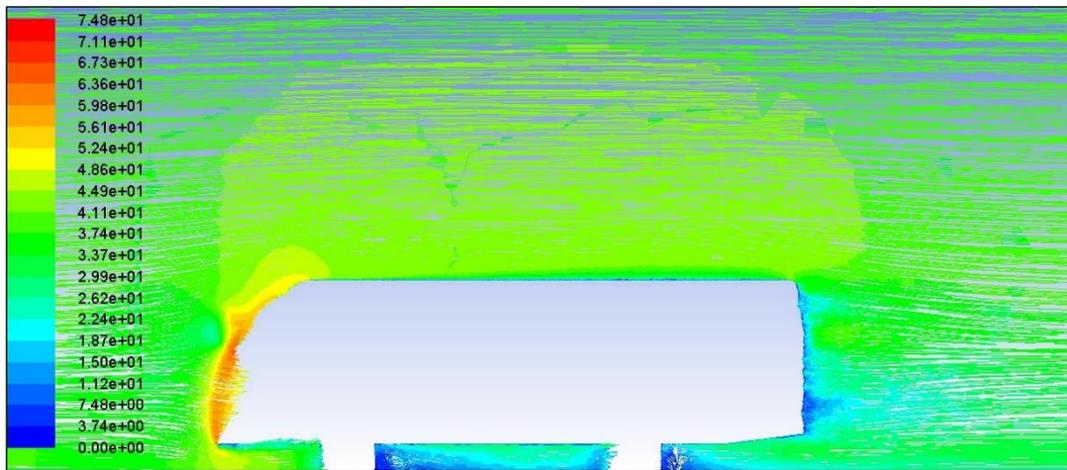


Figura 45. Líneas de corriente en plano paralelo al YZ. Color representa velocidad (m/s).

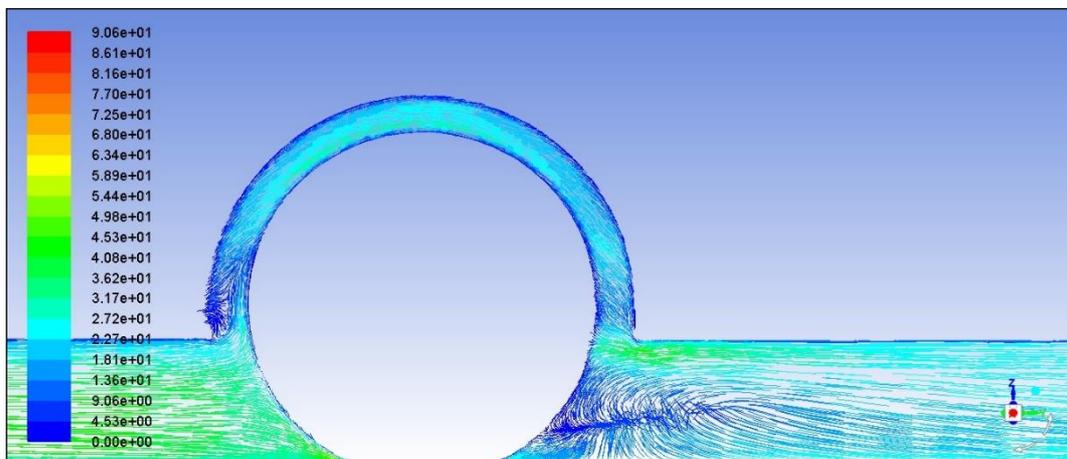


Figura 46. Detalle de rueda delantera en modelo 1. Color representa la velocidad (m/s).

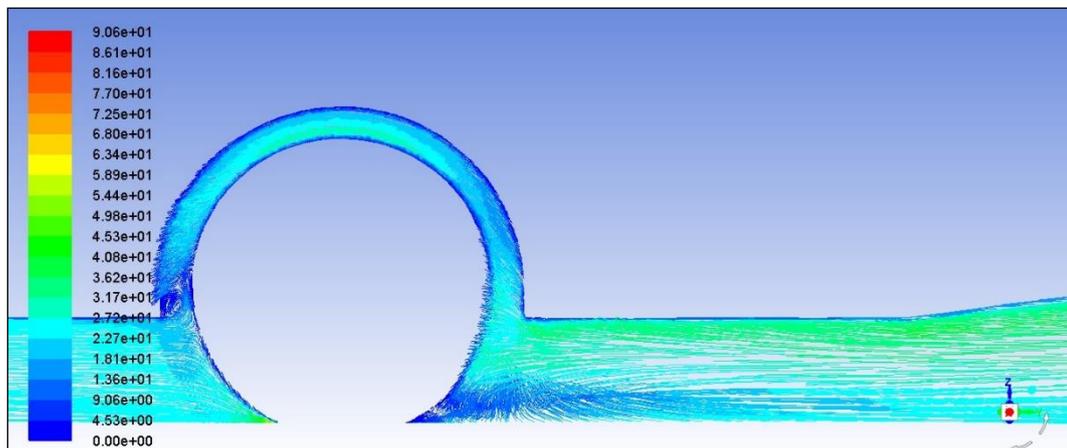


Figura 47. Detalle de rueda trasera en modelo 1. Color representa la velocidad (m/s).

Observando las figuras recién plasmadas del modelo 1, nos damos cuenta que tanto en la parte trasera de las ruedas como a la entrada del paso de ruedas (espacio entre el guarda-barros y el neumático) tenemos zonas turbulentas y efectos turbulentos, quizás los que se producen en la parte posterior de la rueda delantera sean algo más severos que los que se producen en la misma zona de las ruedas traseras; en la zona de guarda-barros y

alrededor de la rueda el efecto turbulento que se producen en ambas ruedas es muy parecido y también se confirma de manera medianamente decente la condición de no-deslizamiento (velocidad cero) a lo largo de los contornos de dichas partes. No vamos a entrar a comentar las causas de por las que se producen ahí ni la responsabilidad de la geometría diseñada en el origen de las mismas, porque es tarea muy compleja y solamente el dedicarnos a minimizar o sofocar cualquiera de las turbulencias de las que estamos detectando sería objeto de otro trabajo como este con dedicación plena para lograr ese objetivo, simplemente con localizar donde se producen y establecer si el impacto que crean es parecido al impacto que crean los modelos simplificados, en este caso concreto, el modelo 2, será más que suficiente. Siguiendo en esta línea ateniéndonos a lo que hemos comentado ahora mismo, el cambio de los bloques por las ruedas a nivel gráfico no revela una diferencia considerable en cuanto a impacto turbulento.

Para plasmar las figuras recién expuestas hemos tenido que pagar un coste computacional medio-alto (en tiempo y en encontrar una resolución de línea de corriente “adecuada”) además teniendo en cuenta que el plano en el que estamos analizando ahora no contiene las mismas líneas de corriente que contenía el plano YZ con el que estábamos trabajamos al principio, podríamos utilizar otro tipo de recursos gráficos tales como gráficas vectoriales que nos serán mucho más rentables y aportarán información parecida.

En cuanto al modelo 3 y modelo 4, no nos molestamos en analizarlos gráficamente más allá de lo que sabemos de ellos por vía numérica. No les dedicaremos recursos gráficos porque no sirven de aproximación para simplificar nuestro modelo 1 y ya automáticamente les descartamos para continuar con el estudio aerodinámico.

## **5.2 ESTUDIO AERODINÁMICO DEL MODELO SIMPLIFICADO**

Analizados los resultados del primer estudio aerodinámico a los que hemos sometido a los cuatro modelos, hemos concluido que el modelo 2, que carece de cajetín de aire acondicionado y de pasos de ruedas con sus respectivas ruedas, es una simplificación apta con respecto al modelo 1 para continuar con más estudios aerodinámicos. Por lo tanto, centramos nuestra atención en el modelo 2 y le someteremos a diferentes condiciones de viento frontal, y a partir de ahí, sacaremos valores y apoyo gráfico para ver cómo se comporta.

Seguimos estudiando para una velocidad de circulación de 100 km/h. El estudio anterior lo hemos simulado para tener en cuenta el sobre-efecto aerodinámico que supone tener un viento en contra de unos 40 km/h. Como tratábamos de comparar los comportamientos de los cuatro modelos, teníamos que hacerlo en lo que consideramos las condiciones más adversas posibles. Como el modelo 2 se comportó a efectos prácticos como el modelo detallado 1, cabe decir, que para condiciones de viento menos desfavorables el modelo 2

también haría una buena imitación al comportamiento que sufriría el modelo 1 en sus mismas condiciones. La velocidad del viento hay que tenerla en cuenta en la entrada al dominio que se sumará o restará a la velocidad a la que vaya el autobús según haya viento a favor o viento en contra. Naturalmente, la carretera siempre se va a mover a la misma velocidad que a la que va el autobús (100 km/h).

Tabla 3. Fuerzas aerodinámicas para velocidades de entrada. Unidades en (km/h) para velocidad; y en (N) para fuerza.

$V_{\text{Bus}}$	$V_{\text{Viento}}$	$V_{\text{Inlet}}$	$F_{\text{Presión,D}}$	$F_{\text{Fricción,D}}$	$F_{\text{D}}$	$F_{\text{Presión,L}}$	$F_{\text{Fricción,L}}$	$F_{\text{L}}$	$C_{\text{D}}$	$C_{\text{L}}$
100	40	140	2615.65	351.82	2967.47	-89.16	2.72	-86.43	0.339	-0.009
100	20	120	1888.98	259.72	2148.71	-39.69	1.87	-37.81	0.340	-0.005
100	0	100	1279.93	186	1460.97	-61	1.30	-60.31	0.341	-0.014
100	-20	80	785.14	115.64	900.78	-4.69	0.06	-4.63	0.340	-0.001

Los valores obtenidos en rasgos generales son razonables a lo que cabía esperar en referencia que obtuvimos en el estudio 1. Llama un poco la atención como para el caso de 120 km/h hay menos sustentación negativa que para 100 km/h, y observando la tabla, vemos que el origen de ese valor viene de que la fuerza de presión que la compone es más alta que en el caso de 100 km/h. Vamos a buscar apoyo gráfico para ver si conseguimos entender a rasgos generales lo que está pasando.

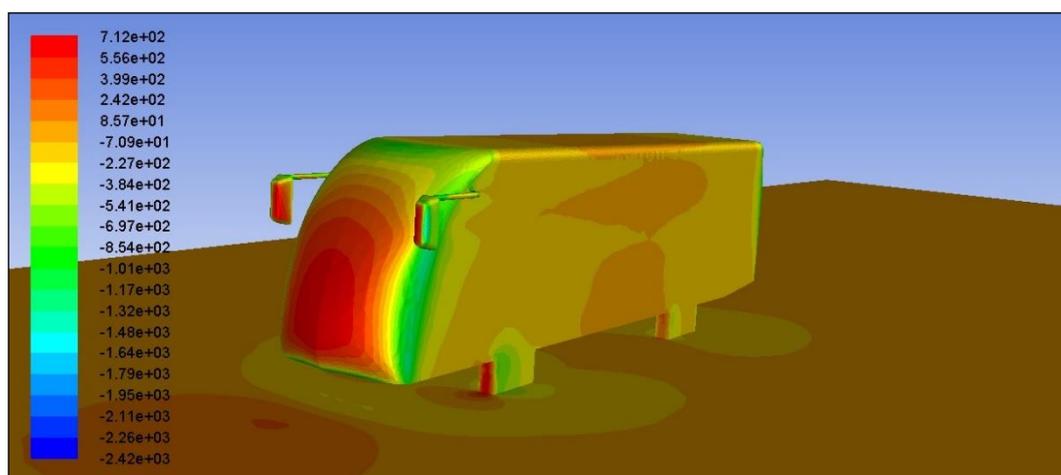


Figura 48. Gráfica de contorno. Color representa la presión (Pa); [120 km/h]

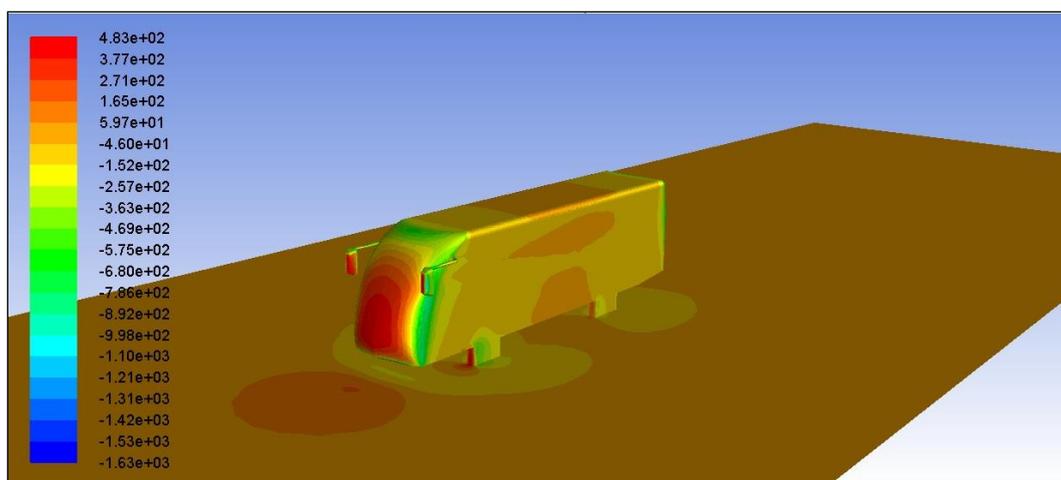


Figura 49. Gráfica de contorno en plano ZY. Color representa la presión (Pa); [100 km/h]

Para encontrar una respuesta inmediata y rápida hemos recurrido a observar estas gráficas de contorno de presión sobre la superficie del autobús; y aparte de las variaciones de presión propias a cada caso no encontramos resquicio alguno que nos pueda dar algún tipo de indicio de porque se produce eso, naturalmente también hemos observado las partes del autobús que no salen en las figuras tomadas, por simplicidad (y no íbamos a mostrar más mapas de contorno en vano), por lo que, vamos a tabular la sustentación relativa a presión de cada una de las partes más importantes para cada condición de viento.

Tabla 4. Fuerza de sustentación debida a presión en las diferentes partes del modelo 2.

PARTES	$F_{L\text{Presión}}$ (N) [80 km/h]	$F_{L\text{Presión}}$ (N) [100 km/h]	$F_{L\text{Presión}}$ (N) [120km/h]	$F_{L\text{Presión}}$ (N) [140km/h]
Espejos	10.990	18.811	28.257	39.518
Frontal	347.35	563.011	830.519	1149.672
Perfil	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
Trasera	102.390	176.120	267.716	376.874
Techo	1083.71	1764.629	2608.894	3616.778
Suelo	-1623.475	-2584.159	-3775.079	-5228.665
Ruedas (simplificadas)	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable

A la vista de los resultados de la tabla, donde también hemos introducido las fuerzas de presión que originan la fuerza de sustentación a 140 km/h y 80 km/h para tener más información al respecto, podemos sacar en claro que lo que pasa es una cuestión del propio balance matemático, no hay ninguna parte del autobús que para cualquiera de los casos y en especial los que entran en conflicto (100 km/h y 120 km/h) tenga una fuerza sustentación

originada por presión que se salga de la tendencia creciente o decreciente de los valores para cada fila de la tabla, pero claro, también debido a la no linealidad de cada valor de fuerza en el problema, el balance puede alcanzar ciertos valores netos que despisten esa tendencia, como nos ha pasado en este caso. En cualquier caso, esta fuerza es muy baja y como dijimos al principio, en comparación al peso que actúa en su misma dirección, es despreciable en cualquiera de los casos analizados en relación a la sustentación, que ojo, no tiene por qué serlo en relación al esfuerzo de momento de cabeceo que puede llegar a producir, de ahí, nuestro interés por conocer esta fuerza con meridiana nitidez.

Por otro lado, para tener una idea del patrón de variación que sigue nuestra principal variable aerodinámica ( $F_D$ ), hacemos un ajuste cuadrático por mínimos cuadrados (Figura 50. Regresión cuadrática por mínimos cuadrados.), si bien es verdad, que también podíamos haber utilizado una interpolación cúbica ya que no tenemos muchos valores y los que tenemos no dan síntoma de una notable dispersión.

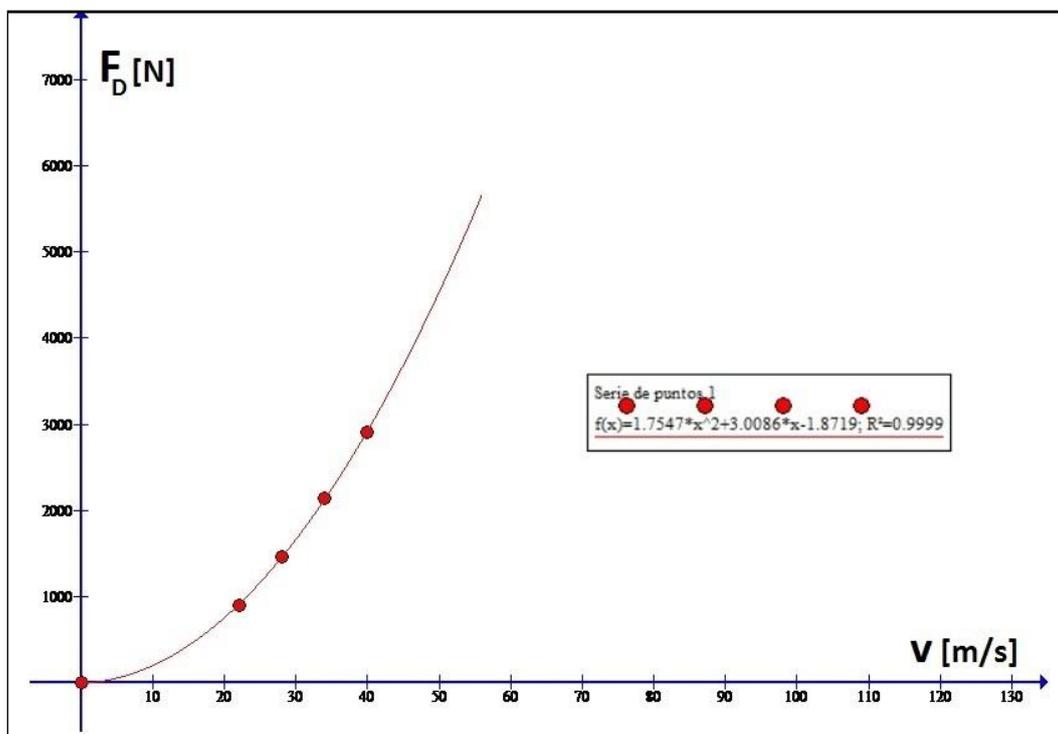


Figura 50. Regresión cuadrática por mínimos cuadrados.

Además, observando la tabla 3, se observa una estabilización del coeficiente de arrastre  $C_D$  con respecto a la velocidad de entrada, que, basándonos en la teoría de análisis dimensional (ver teoría dimensional 3.7.2), el  $C_D$  permanece estable para valores altos del número de Reynolds; dicho esto, podemos decir que para velocidades superiores a 140 km/h donde el número de Reynolds será mayor de  $8.494 \cdot 10^6$ , el coeficiente de arrastre  $C_D$  será del orden de 0.340 siendo éste el valor medio a partir de los coeficientes de arrastre obtenidos.

$$C_D = \sum_{i=1}^4 \frac{C_{Di}}{4} = 0.340$$

$$Re = \frac{L \cdot v}{\mu} = \frac{3.80 \cdot 40}{1.7894 \cdot 10^{-5}} = 8.494 \cdot 10^6$$

Plasmando esta última idea matemáticamente, obtenemos la siguiente parábola que nos describirá la fuerza de arrastre en función de la velocidad de entrada, válida para valores altos de velocidad. Lógicamente, no vale para predecir el comportamiento a valores extremadamente altos de velocidad porque ya entraríamos en flujo compresible ( $Ma > 0.3$ ) y eso ya es otro mundo, pero en ese sentido podemos estar tranquilos porque un autobús nunca irá a tales velocidades. Dicho esto, aquí tenemos la curva de arrastre-velocidad:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \rightarrow 0.340 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot v^2 \cdot 8.9138} \rightarrow \boxed{F_D = 1.856 \cdot v^2}$$

Esta curva por definición tiene que estar muy próxima a la curva de regresión con la que aproximamos el comportamiento en primera instancia. Para comprobarlo, plasmamos la Figura 51.

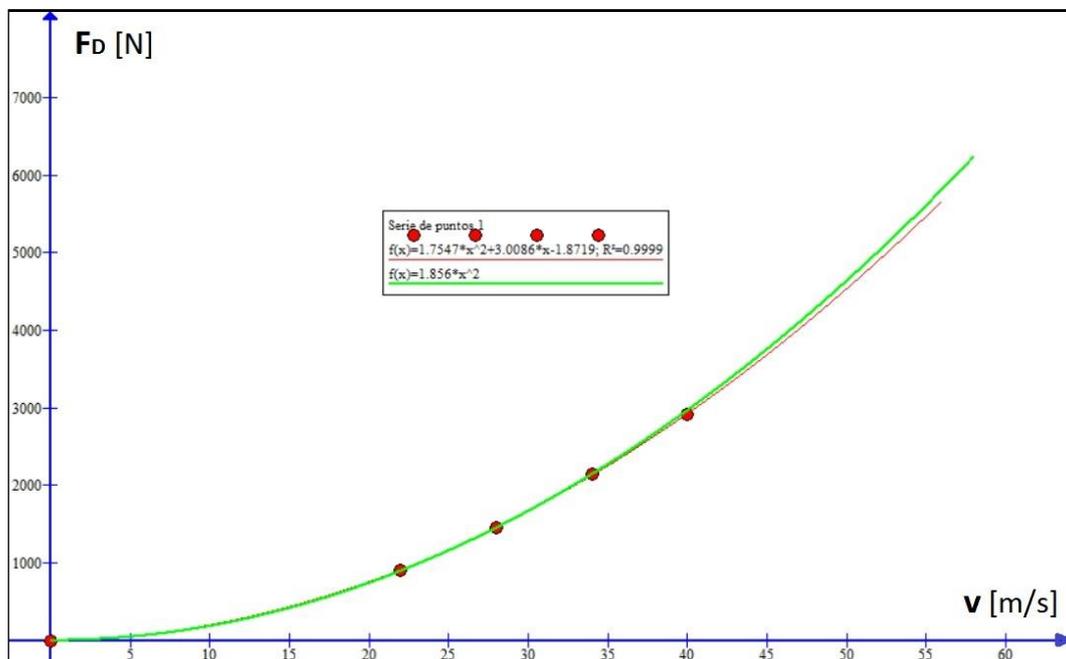


Figura 51. Curva de regresión cuadrática (roja) y parábola aerodinámica (verde).

Por tanto, en la Figura 51, apreciamos solape y cercanía de la curva aerodinámica con la curva de regresión en el dominio estudiado, con lo cual, quedan confirmadas de manera gráfica las ideas anteriores y la validez de los datos obtenidos en CFD.

**Contribución al arrastre de cada parte del autobús**

Vamos a calcular el arrastre que se produce en cada una de las partes en las que hemos dividido la superficie exterior del autobús, así como, el porcentaje de arrastre que representa cada parte con respecto al arrastre total (a los efectos de ya haberse producido, no en la responsabilidad de las causas) lo vamos a hacer para las cuatro velocidades de entrada que hemos estudiado, por lo tanto, tabulando obtenemos:

PARTES	$F_D$ [80km/h]	% [80km/h]	$F_D$ [100km/h]	% [100km/h]	$F_D$ [120km/h]	% [120km/h]	$F_D$ [140km/h]	% [140km/h]
<b>Espejos</b>	10	16.245	236.897	16.215	349.26	16.254	483.297	16.343
<b>Frontal</b>	128.843	14.303	209.135	14.314	308.817	14.372	428.527	14.491
<b>Laterales</b>	58.495	6.493	91.591	6.269	131.546	6.122	178.142	6.024
<b>Zaga</b>	310.743	34.496	514.156	35.192	761.393	35.434	1041.389	35.216
<b>Techo</b>	21.609	2.398	34.091	2.333	49.176	2.288	66.826	2.259
<b>Ruedas</b>	188.344	20.908	302.392	20.695	443.636	20.646	613.445	20.794
<b>Suelo</b>	46.416	5.152	72.738	4.978	104.879	4.881	145.485	4.919
<b>TOTAL</b>	900.786	100	1460.973	100	2148.711	100	2967.47	100

Tabla 5. Fuerza de arrastre para cada parte del autobús. Fuerza en (N).

El peso del porcentaje perteneciente a cada parte permanece más o menos constante ante los cambios de velocidad, en base a esto, vemos que la parte que más contribuye a los efectos del arrastre es la parte trasera, con un aporte de más o menos un 35%; seguido de las ruedas con un aporte del orden del 20%; en tercer lugar, tenemos los espejos que colaboran en torno al 16 %; y en cuarta posición, el frontal con un protagonismo que se mueve en torno al 14 %. El resto juega un papel más secundario en el aporte al arrastre. Para tener una idea del cambio en la fuerza de arrastre que se produce con la velocidad, aportamos la Figura 52, cuyas curvas nacen de la aplicación de la regresión cuadrática a los valores de la obtenidos. Cada curva de la gráfica se refiere a una parte del autobús, la gráfica roja es relativa a los espejos, el color cian al frontal, la azul a los laterales, la amarilla a la trasera, la gris al techo, la morada a las ruedas y la marrón al suelo. Esta gráfica nos reafirma en la importancia de los elementos porcentualmente destacados, y, además, pone de manifiesto que los laterales y el suelo para velocidades muy altas podrían llegar a intercambiar los papeles (tales velocidades no van a ser alcanzadas por un autobús pero es interesante conocer el comportamiento de estos elementos a dichas velocidades), y finalmente observamos la debilidad del techo para producir arrastre, ya que como hemos visto en la tabla

4, su plato fuerte es el de manifestar sustentación que será compensada con la sustentación contraria que aporta el suelo.

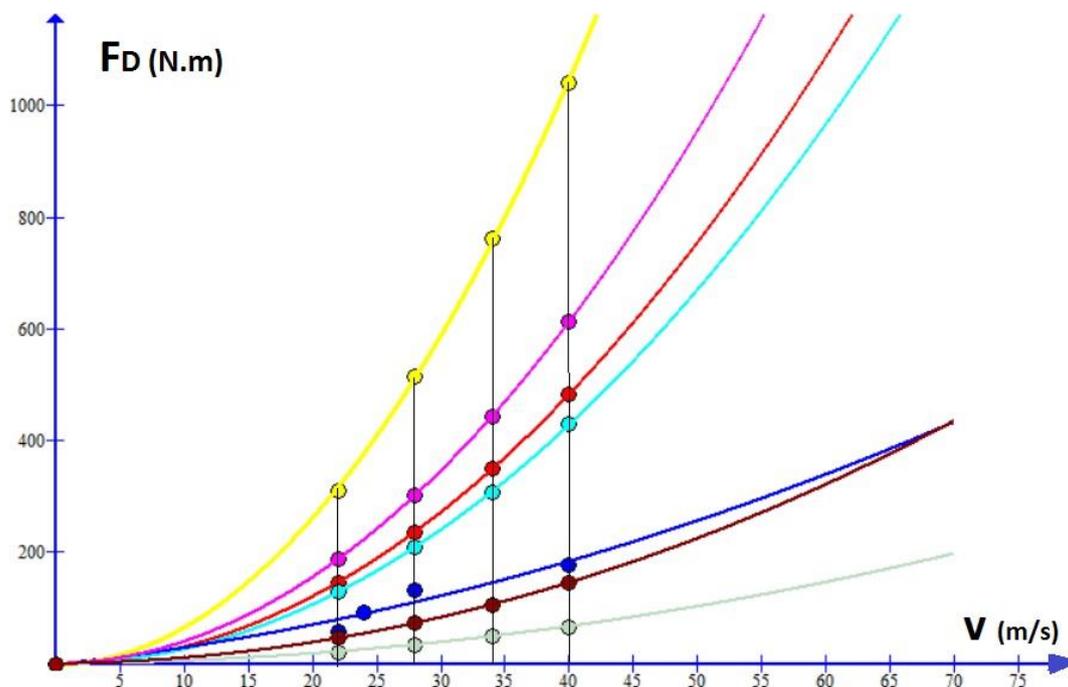


Figura 52. Variación de la fuerza de arrastre en cada parte en función de la velocidad.

### Centro de presiones

Vamos a hallar el centro de presiones para cada uno de los casos de viento anteriores. Ni que decir tiene, que el centro aerodinámico no depende de la velocidad de entrada de flujo de aire (ver teoría centro de presiones 3.8.1) y tiene que dar el mismo resultado para cada uno de los cuatro casos, y precisamente, como tiene que dar lo mismo en los cuatro casos nos apoyaremos en eso para comprobar la veracidad de los resultados de presión obtenidos por CFD.

Centro de presiones	80 (km/h)	100 (km/h)	120 (km/h)	140 (km/h)
$C_{PX}$ (m)	0	0.001	0	0.001
$C_{PY}$ (m)	15.562	15.576	15.591	15.596
$C_{PZ}$ (m)	2.033	2.045	2.055	2.061

Tabla 6. Tabla de centro de presión

En primer lugar, apreciamos uniformidad en los resultados, pero, aun así, vamos a calcular un valor medio de  $C_{Py}$  y de  $C_{Pz}$  para tener un  $C_P$  promedio con el que realizar los sucesivos cálculos; el  $C_{Px}$  consideraremos directamente que es cero por la propia simetría de la geometría y por tener viento frontal perfectamente alineado con la dirección de la marcha del autobús.

$$C_{Px} = 0$$

$$C_{Py} = \sum_{i=1}^4 \frac{C_{Py_i}}{4} = 15.581 \text{ m}$$

$$C_{Pz} = \sum_{i=1}^4 \frac{C_{Pz_i}}{4} = 2.048 \text{ m}$$

### Cálculo de los momentos aerodinámicos

Conocido el centro de presiones podemos proceder al cálculo de momentos. El momento de guiñada y el momento de balanceo serán cero para nuestro caso, a consecuencia de tener  $C_{Px}=0$  y simultáneamente  $C_{Px}$  estar contenido en el mismo plano vertical que el centro de gravedad del autobús. La Figura 53, nos da cuenta gráfica de esto.

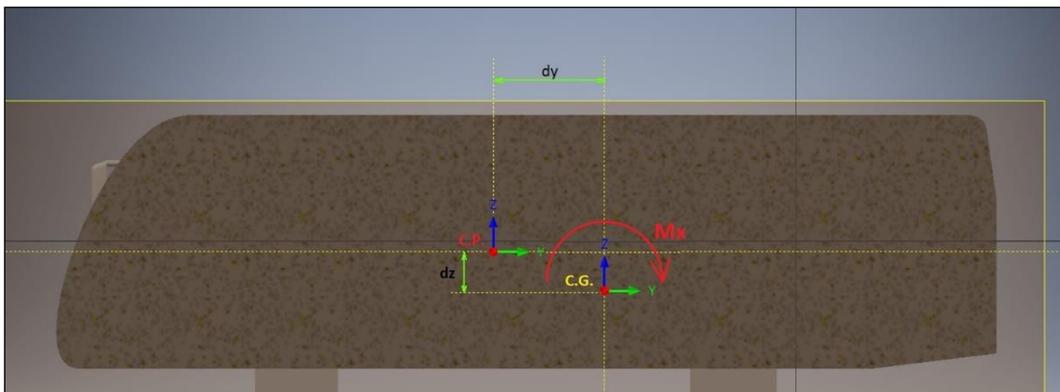


Figura 53. Corte por el plano de simetría YZ. Se observan las distancias entre C.P. y C.G.

El momento de cabeceo ( $\vec{M}_X$ ) será, por tanto:

$$\vec{M}_X = (F_Y \cdot d_Z + F_Z \cdot d_Y) \vec{i}$$

Teniendo en cuenta las distancias tomadas desde nuestro sistema de coordenadas tendremos que el módulo de  $\vec{M}_X$  en función de la fuerza de arrastre y de la fuerza de sustentación será:

$$M_X = F_Y \cdot 0.498 + F_Z \cdot 1.419$$

Tabulando los momentos de cabeceo para cada valor de fuerza de arrastre y de sustentación en cada condición de viento, obtenemos la siguiente tabla, el sentido del momento de cabeceo para los valores de fuerzas tomados es el que vemos en la Figura 53.

Velocidad entrada (km/h)	<b>M<sub>x</sub></b> (N·m)
140	1355.155
120	1016.405
100	641.833
80	442.018

Tabla 7. Momento de cabeceo en función de la velocidad de entrada

Tomando representación gráfica de estos valores obtenemos la Figura 54.

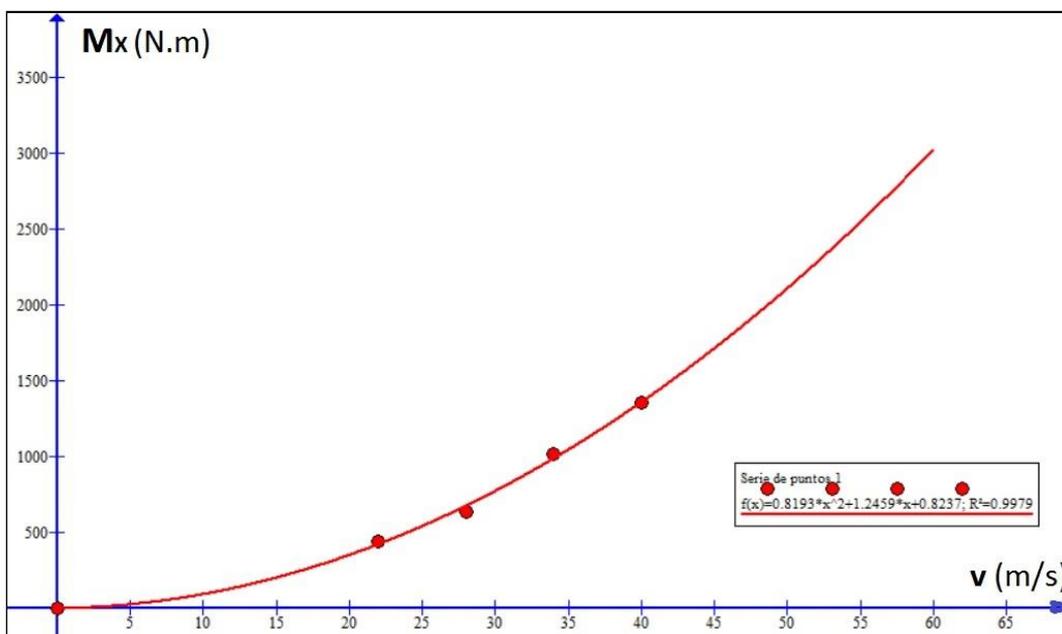


Figura 54. Regresión cuadrática por mínimos cuadrados del M<sub>x</sub> frente a velocidad.

Finalmente, no vamos a entrar en cómo repercute este momento de cabeceo en la dinámica del autobús, pero lo que, si sabemos, es que desde el punto de vista aerodinámico nos interesaría que este momento si se produjese lo haría en sentido contrario al que se produce, agachando ligeramente la delantera y reduciendo así la resistencia aerodinámica. (Setra, 2017). A continuación, vamos a calcular el valor de la fuerza de sustentación que ha de producirse para que el momento de cabeceo sea nulo.

$$\left. \begin{aligned}
 M_x &= F_Y \cdot 0.498 + F_Z \cdot 1.419 = 0 \\
 F_Y &= 1.856 \cdot v^2
 \end{aligned} \right\} \boxed{F_Z = -0.651 \cdot v^2}$$

Estando esta ecuación influenciada por las mismas condiciones que rigen el comportamiento de la parábola de la fuerza de arrastre, por lo tanto, graficando obtenemos la Figura 55.

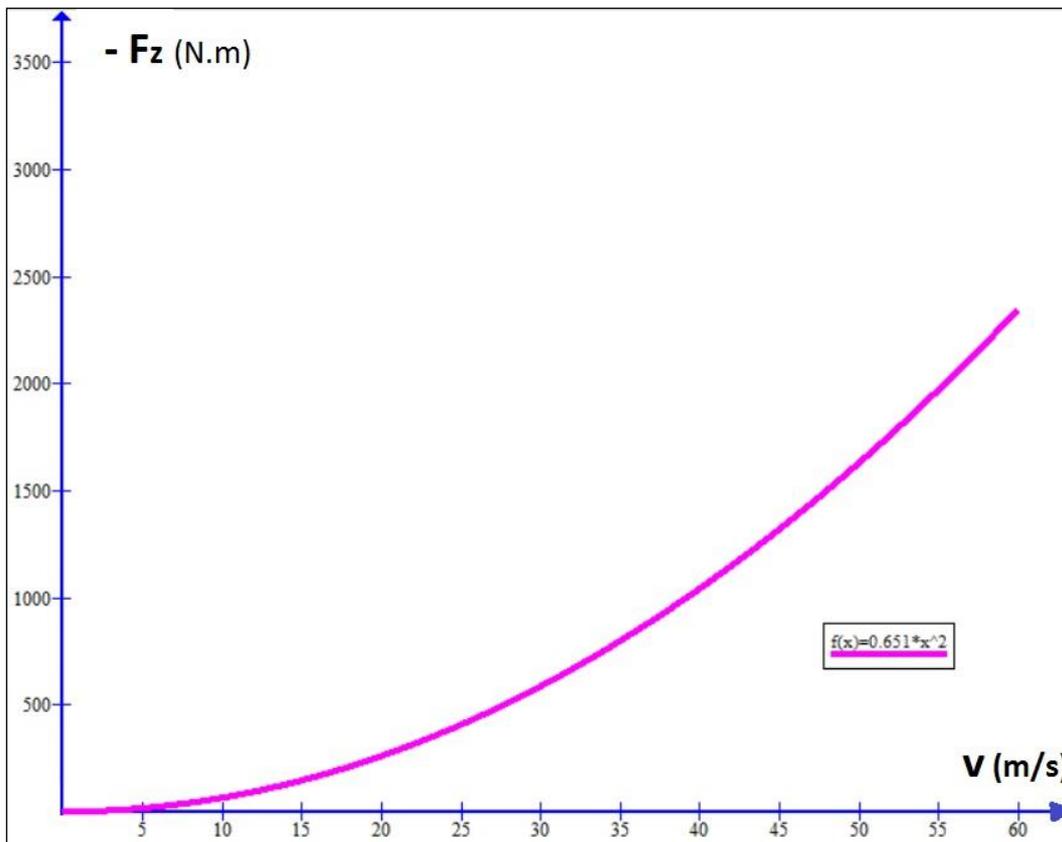


Figura 55. Parábola de sustentación para la condición de cabeceo aerodinámico nulo.

### Estimación del impacto aerodinámico en el consumo

Para hacer una estimación, vamos a utilizar el modelo 3 y el modelo 4. Compararemos el consumo entre estos dos porque ambos poseen las mismas simplificaciones en cuanto a elementos, en ese sentido están en igualdad de condiciones para establecer comparación, lo que les diferencia es que el modelo 3 cuenta con características que le confieren mejor comportamiento aerodinámico ( $C_D=0.292$ ) comparado con el modelo 4 ( $C_D=0.670$ ).

Apoyándonos en que sabemos que el coeficiente de arrastre permanece estable para números de Reynolds altos, (ver teoría del apartado 3.7.2), calculamos la fuerza de arrastre a 100 km/h (28m/s) para cada modelo.

$$F_3 = C_{D_3} A_3 \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = 0.292 \cdot 8.4385 \cdot 1.225 \cdot \frac{28^2}{2} = 1185.23 \text{ N}$$

$$F_4 = C_{D_4} A_4 \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} = 0.670 \cdot 8.4550 \cdot 1.225 \cdot \frac{28^2}{2} = 2720.26 \text{ N}$$

A continuación, calculamos los trabajos que producen estas fuerzas, siendo el trabajo:  $W_D = \vec{F}_D \cdot \vec{d} \rightarrow W_D = F_D \cdot d$ , donde ( $F_D$ ) es la Fuerza de arrastre y ( $d$ ) es el desplazamiento, que haciendo una estimación de 800 km al día que recorre un autobús de largo recorrido a velocidad crucero de 100 km/h, obtenemos los siguientes trabajos de las fuerzas aerodinámicas:

$$W_{D_3} = F_{D_3} \cdot d = 1185.23 \cdot 800 \cdot 10^3 = 948 \cdot 10^3 kJ$$

$$W_{D_4} = F_{D_4} \cdot d = 2720.26 \cdot 800 \cdot 10^3 = 2176 \cdot 10^3 kJ$$

Considerando que el rendimiento efectivo (incluye toda clase de pérdidas) en un vehículo con motor diesel está en el orden del 40%, tendremos que la energía necesaria ( $E$ ) que ha de aportarnos el combustible para afrontar este trabajo será en cada caso de:

$$E_3 = \frac{W_{D_3}}{\eta} = \frac{948 \cdot 10^3 kJ}{0.4} = 2.37 \cdot 10^6 kJ$$

$$E_4 = \frac{W_{D_4}}{\eta} = \frac{2176 \cdot 10^3 kJ}{0.4} = 5.44 \cdot 10^6 kJ$$

El poder calorífico del diesel está en el orden de 42500 kJ/kg y la densidad está del orden de 0.850 kg/L, por lo que los litros necesarios para realizar el trabajo en cada caso serán:

$$V_3 = \frac{\text{masa de combustible}_3}{\text{densidad}} = \frac{\frac{\text{Energía}}{\text{Poder calorífico}_3}}{\text{densidad}} = \frac{\frac{2.37 \cdot 10^6 kJ}{42500 kJ/kg}}{0.85 kg/L} = 65.6 L$$

$$V_4 = \frac{\text{masa de combustible}_4}{\text{densidad}} = \frac{\frac{\text{Energía}}{\text{Poder calorífico}_4}}{\text{densidad}} = \frac{\frac{5.44 \cdot 10^6 kJ}{42500 kJ/kg}}{0.85 kg/L} = 150.58 L$$

Supone una variación de unos 85 L/día que estimando el precio de combustible diesel a un euro el litro de combustible, para hacernos una idea aproximada del impacto económico, supone unos 85 euros de diferencia en la jornada diaria.

Datos genéricos extraídos de (Çengel, 2012)

## 6 CONCLUSIONES

Basándonos en lo que hemos analizado en este trabajo podemos sacar las siguientes conclusiones e ideas:

-Desde el punto de vista aerodinámico, elementos como el cajetín del aire acondicionado y la forma frontal de las ruedas son despreciables en lo que al arrastre se refiere, es decir, con respecto a la variación de la fuerza de arrastre y a la variación del coeficiente aerodinámico.

-Por el contrario, los espejos del autocar si son elementos que tienen una influencia considerable en el comportamiento aerodinámico, en nuestro caso, se traducen en un aumento de en torno al 22 % en la resistencia aerodinámica con respecto a no llevarlos (en condiciones adversas de viento frontal).

- A rasgos generales, un diseño de autobús aerodinámico con respecto a otro cuya geometría tienda a ser roma, supone grandes diferencias en el comportamiento aerodinámico general. La diferencia más notable es la disminución en alrededor de un 46 % la fuerza de arrastre que se consigue básicamente haciendo una superficie frontal compleja como la que hemos hecho, redondeos y suavizados a lo largo de los perfiles del autobús, una zaga trasera y un rebaje en forma cuña en la parte trasera (en condiciones desfavorables de viento frontal).

-La fuerza de sustentación es despreciable en cualquiera de los casos a los efectos sustentación, pero no tiene por qué serlo a ojos de los efectos del momento de cabeceo que se pueda producir.

-La componente de fricción tanto del arrastre como de sustentación tiene un peso pequeño (un 14% en su manifestación más alta) con respecto a la componente de presión de estas fuerzas.

-La parte del autobús en donde más arrastre se genera es la zaga, que contribuye con un 35 %, seguido de las ruedas con un aporte del 20%, continuando los espejos con un 16 %, y finalmente, el frontal del que habría cabido esperar más aporte, pero contribuye en un 14 %. El 15% restante se lo debatirán entre el resto de los componentes.

-La fuerza de arrastre ( $F_D$ ) tanto del autobús en conjunto como de cada una de sus partes se puede estimar con cierta precisión mediante una expresión parabólica que atiende a la forma  $F_D = k \cdot v^2$ , donde  $k$  será una constante propia para cada autobús o para cada parte del autobús y  $v$  la velocidad.

-Haciendo una estimación de la repercusión en el consumo, un autobús con características aerodinámicas como las que hemos conseguido en este trabajo ( $C_D=0.292$ ) frente a un autobús que carezca de ellas ( $C_D=0,67$ ), puede repercutir en una disminución del consumo de un 56 %. En consecuencia, disminuyendo el gasto económico y las emisiones al medio ambiente.

-En todos los casos independientemente de la velocidad del viento se forman los mismos patrones de recirculación y turbulencia, obviamente, no con la misma intensidad o potencia, ni esas intensidades o potencias turbulentas tendrán que ser proporcionales o lineales con la velocidad del viento.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

### 7.1 LIBROS, TRABAJOS Y OTROS DOCUMENTOS

ÇENGEL, Y.A. 2012. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. John M. Cimbala. 2ª Edición. México: The McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V. ISBN 978-607-15-0779-2.

MATAIX, C. 1986. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2ª Edición. Madrid: Ediciones del Castillo S.A. ISBN 84-219-0175-3.

WHITE, F.M. 2008. *Fluids mechanics*. 6ª Edición. McGraw-Hill Interamericana de España S.L. ISBN 8448166035, 9788448166038.

De Miguel, C.J. 2015. Apuntes del curso 2015-2016 de la asignatura de Automóviles de Grado en Ingeniería Mecánica. E.T.S. Ingenieros Industriales y Telecomunicación, Universidad de Cantabria.

Pérez, S.F. 2015. Apuntes del curso 2014-2015 de la asignatura de Mecánica de Fluidos de Grado en Ingeniería Mecánica. E.T.S. Ingenieros Industriales y Telecomunicación, Universidad de Cantabria.

Comsol. 2015. Airflow Over an Ahmed Body. Biblioteca de casos de estudio. [Tutorial de programa] Tutorial de Comsol Multiphysics v.5.0. EEUU

ANSYS. 2013. ANSYS Fluent Tutorial Guide. [Tutorial de programa] Tutorial de Ansys v.17. U.S.A.

Servicios de Ingeniería para el Sector de Transportes. Análisis DSC. [Material publicitario].

Brunel Vázquez, J.A. 2009. *Efectos perjudiciales del viento lateral en la circulación de trenes de alta velocidad, propuesta, análisis de diferentes medidas de mitigación*. Proyecto fin de carrera, Universidad politécnica de Madrid.

Lanas Pérez, R.D. 2007. *Análisis y optimización de la aerodinámica de la carrocería de un autobús por medio de la utilización de un programa de diseño por análisis de elementos finitos*. O.Arteaga. Tesis fin de grado, Universidad politécnica del Ejército, Ecuador.

Bartrons i Casademont, J. 2014. *Estudio hidrodinámico por CFD del casco de una lancha motora*. Castells i Sanabra, M. Proyecto final de carrera. Facultad de náutica de Barcelona, UPC.

## 7.2 REVISTAS

SETRA FAMILY. 2012. Nº 50. COMFORT CLASS 500 SPECIAL. EVOBÚS GMBH. [marzo 2017]. Disponible en: [www.setra.de](http://www.setra.de).

PROMESA CUMPLIDA. 2012. FACTS. EVOBÚS GMBH. [ABRIL 2017]. Disponible en: [www.setra-bus.com/es-es/paginadeiniciodesetra.html?L=1](http://www.setra-bus.com/es-es/paginadeiniciodesetra.html?L=1).

Olana.A.L. 2011. Seguridad en autobuses y autocares. Centro-Zaragoza, Nº 47. [Enero/marzo 2011]. Páginas consultadas 44-47. Disponible en: [www.centro-zaragoza.com](http://www.centro-zaragoza.com).

Arbide.A. 2016. Premio IBC concedido al autobús Neoplan Skyliner de MAN. EUROPA-CAMIONES. [mayo 2017]. Disponible en: <http://www.europa-camiones.com/news-camiones/a44819/premio-ibc-autobus-neoplan-skyliner-man-html>.

## 7.3 PROGRAMAS DE ORDENADOR

AUTODESK. 2017. INVENTOR PROFESIONAL v.2017. EEUU

COMSOL. 2015. COMSOL MULTIPHYSICS v.5.0. EEUU

ANSYS CFD. 2013. ANSYS FLUENT v .17. U.S.A

GRAPH

## 7.4 SITIOS WEB

Castrosua, 2015. Ludewing Aero: uno de los primeros autocares aerodinámicos. [Blog] Blog Corporativo Castrosua. [Blog] Blog Corporativo Castrosua. [Consulta: marzo 2017]. Disponible en: <http://blog.castrosua.com/primer-autocar-aerodinamico/>.

TÉCNICAL COURSES. 2014. [Consulta: marzo 2017]. Disponible en: [http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog\\_entrada.php?entrada\\_id=89](http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89).

Setra. 2017. [Consulta: junio 2017] Disponible en: [http://gesamtwirtschaftlichkeit.setra.de/es\\_ES/Consumo/Detalles.html](http://gesamtwirtschaftlichkeit.setra.de/es_ES/Consumo/Detalles.html).

Setra. 2017. [Consulta: junio 2017]. Disponible en: <https://www.setra-bus.com/es-es/marca/setraclassic/historia-de-setra/hitos-de-setra.html?L=1>.

Mulpix. 2017. [Consulta: junio 2017]. Disponible en: <https://mulpix.com/post/1190991409371795201.html>

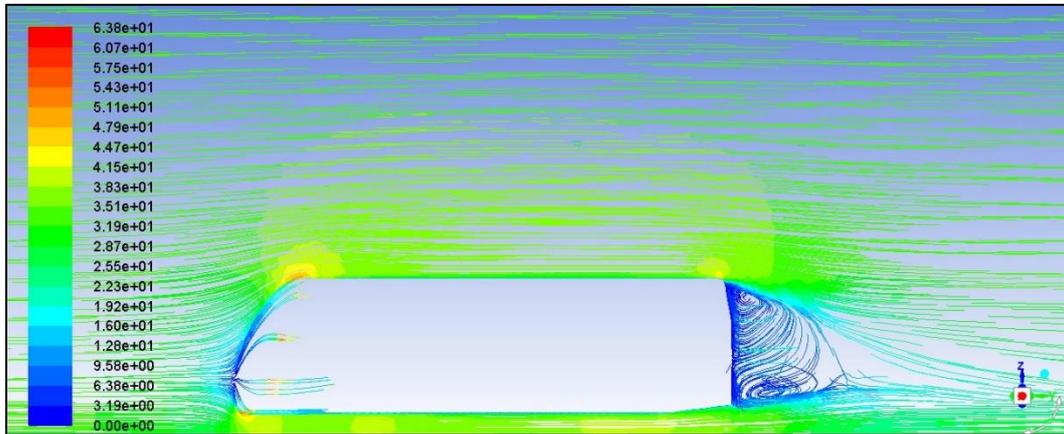
Comsol Blog. 2013. [Consulta: abrir 2017]. Disponible en: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>.

Daimler. 2017. [Consulta: junio 2017] Disponible en: <https://designnavigator.daimler.com/daimler>.

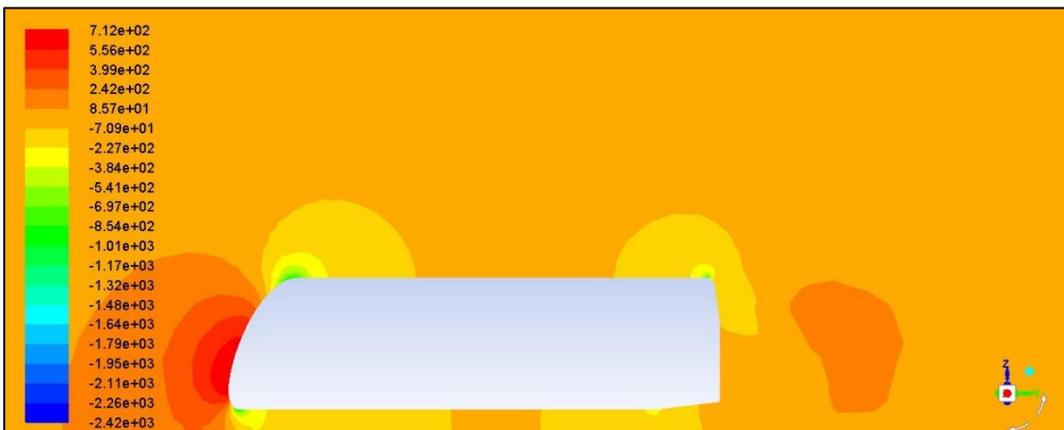
## ANEXOS

### INFOGRAFÍA

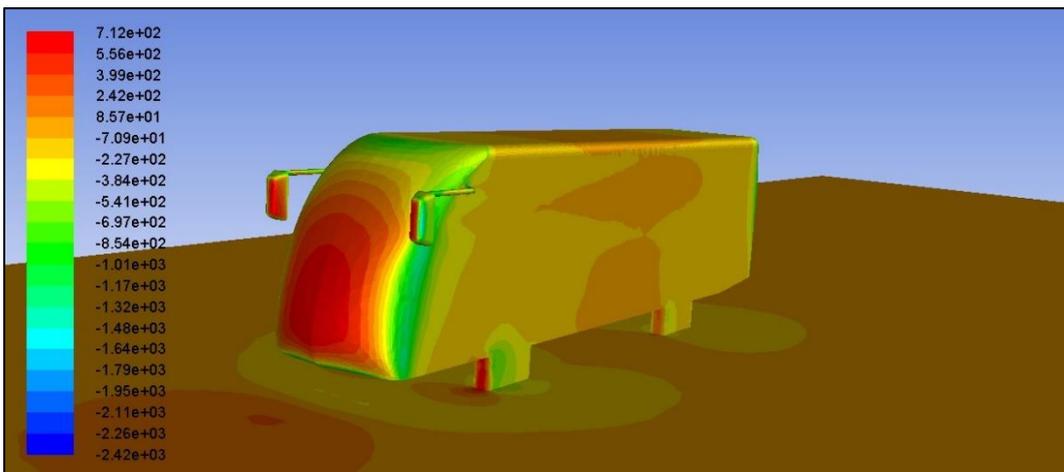
#### Modelo 2; Información gráfica a 40 (m/s)



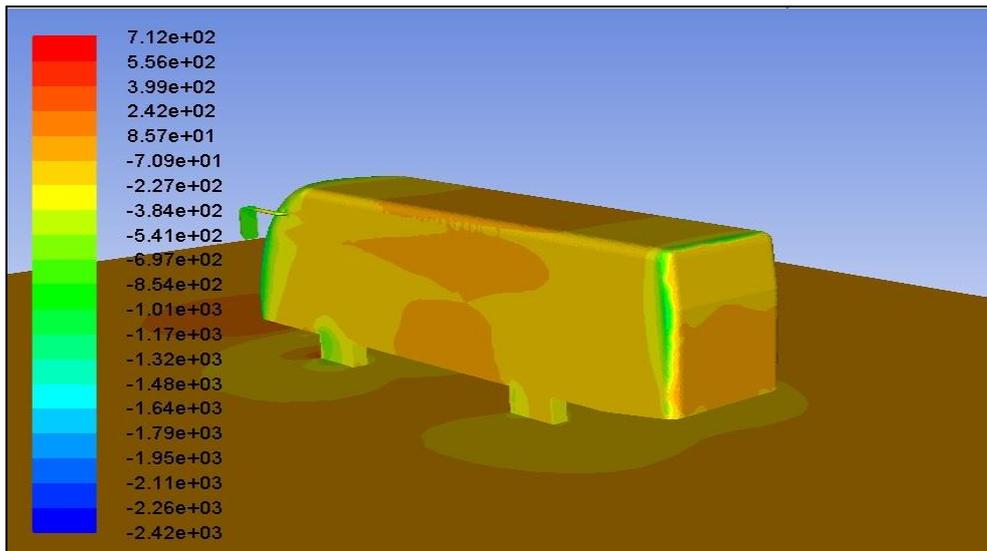
Líneas de corriente en plano YZ. Color representa velocidad (m/s).



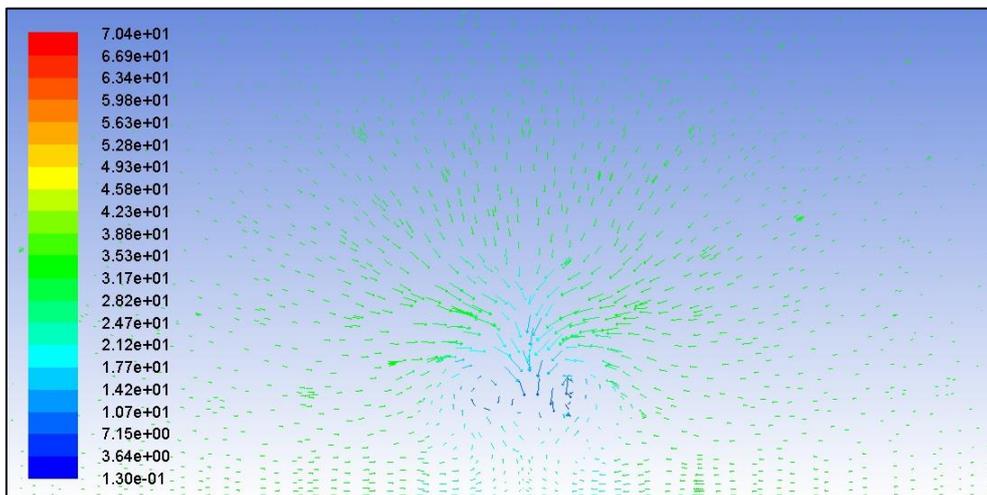
Contorno de presión en plano YZ. Color representa presión estática (Pa).



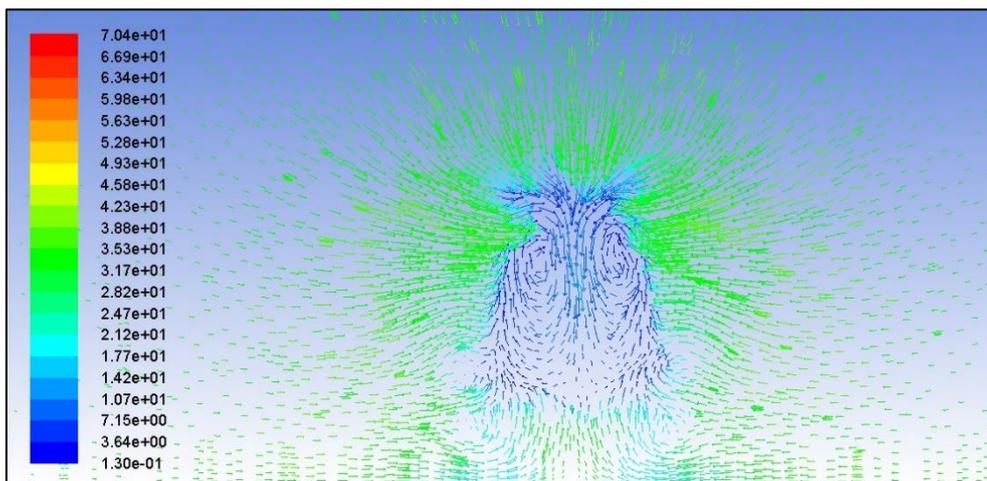
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



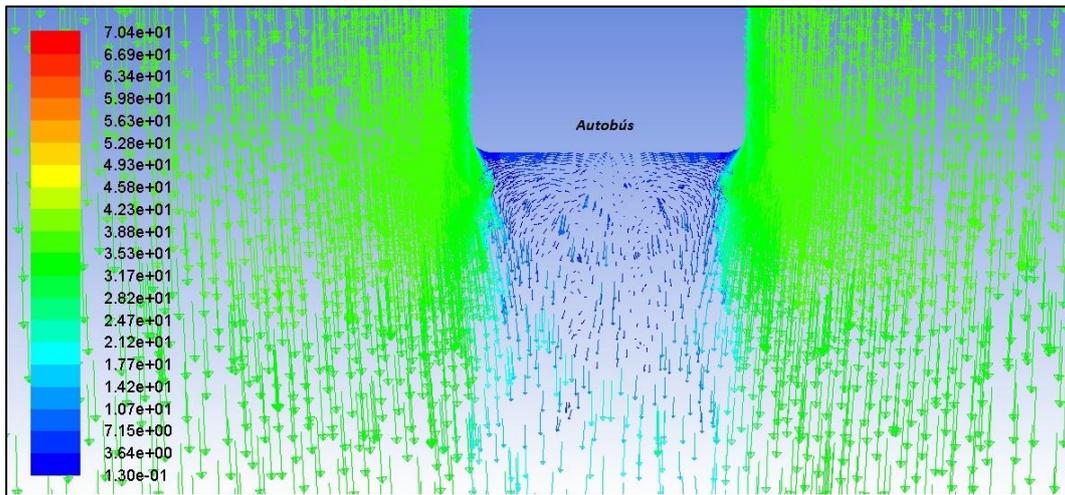
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



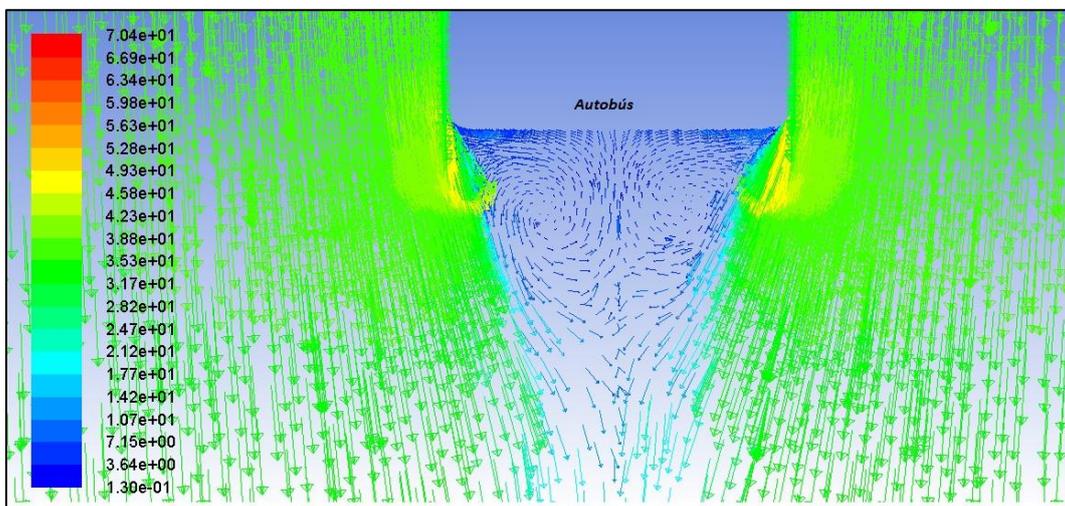
Gráfica vectorial de velocidad a 5 metros de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).



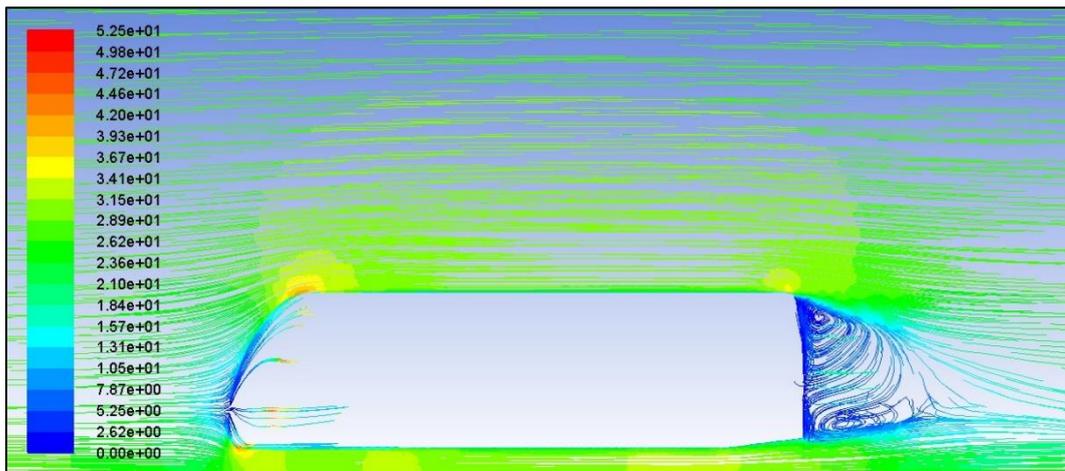
Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).



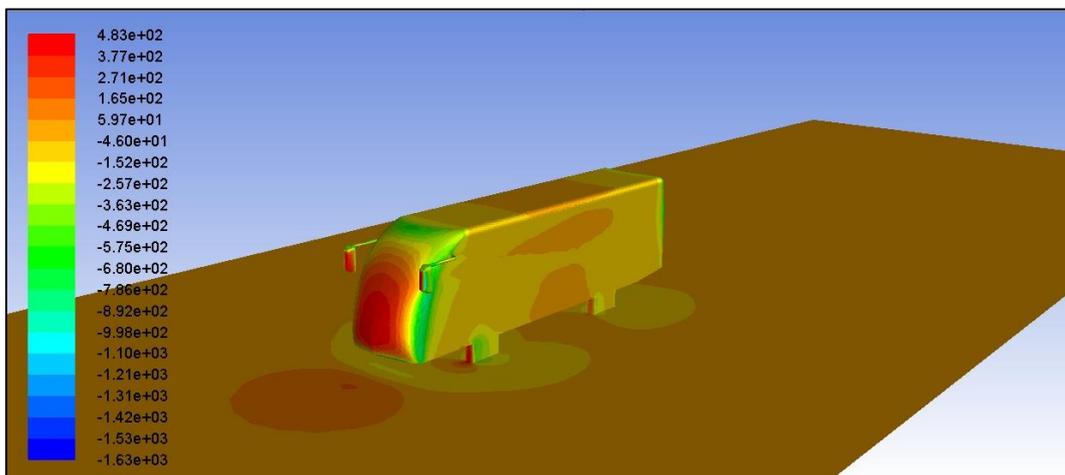
Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la carretera. Color velocidad (m/s).



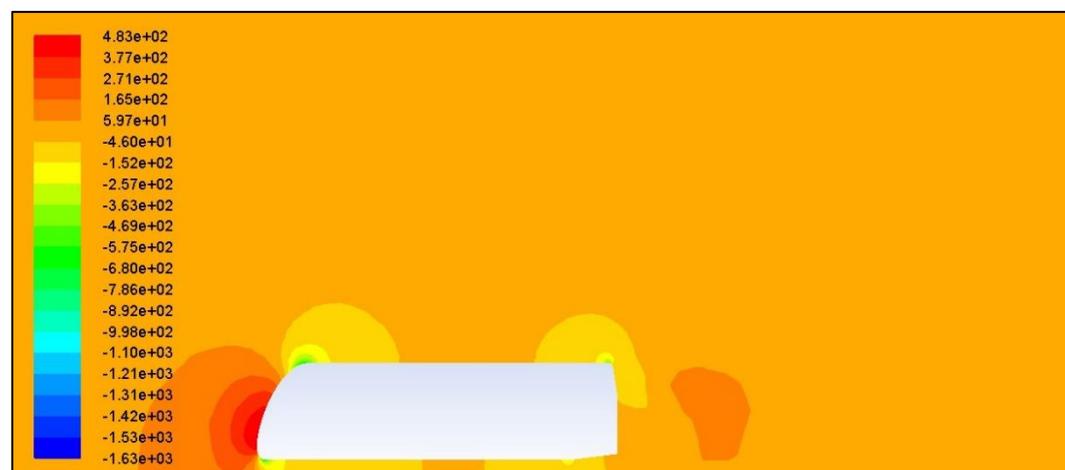
Gráfica vectorial de velocidad a 3 metros de la carretera. Color velocidad (m/s).

**Modelo 2; Información gráfica a 34 (m/s)**

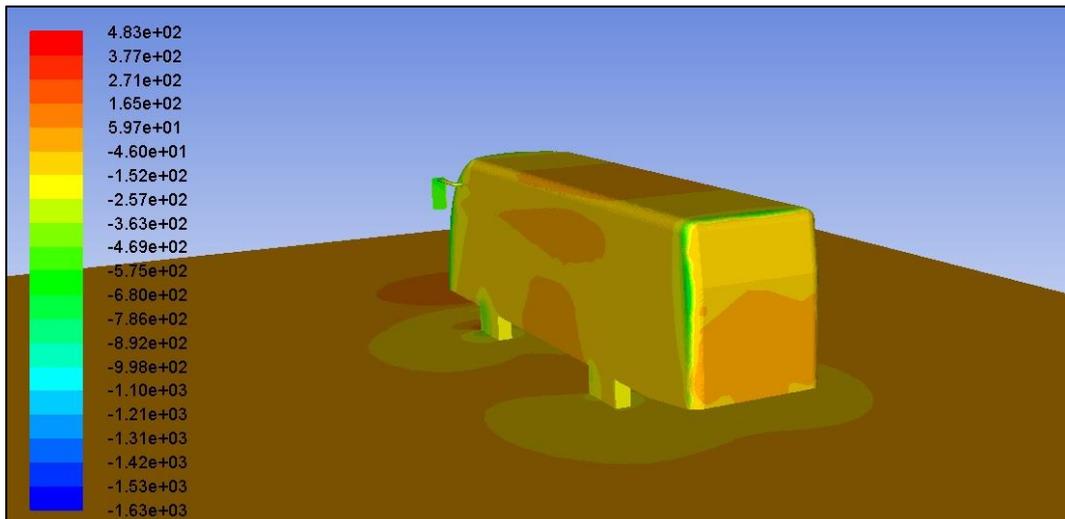
Líneas de corriente en plano YZ. Color representa velocidad (m/s).



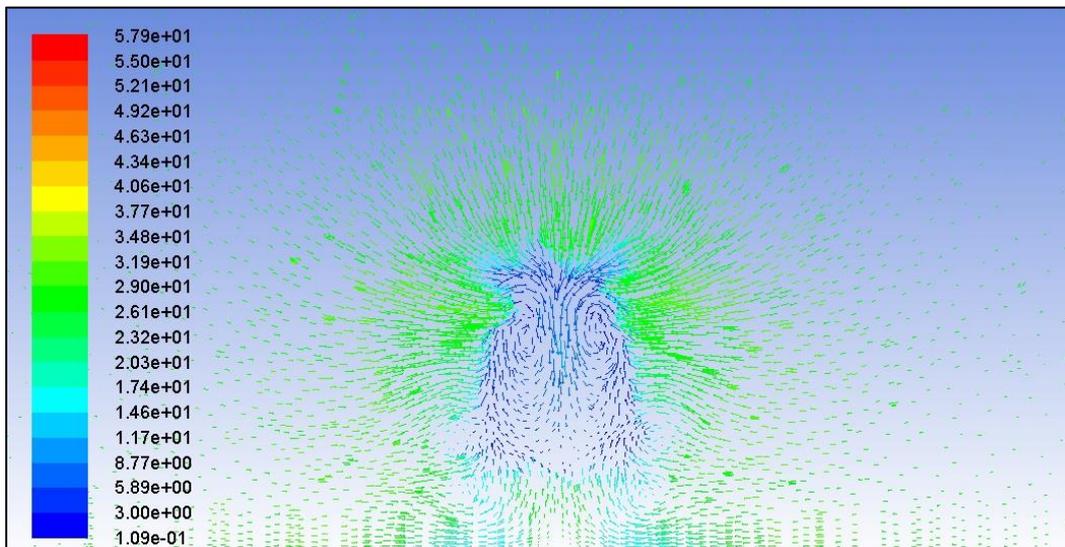
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



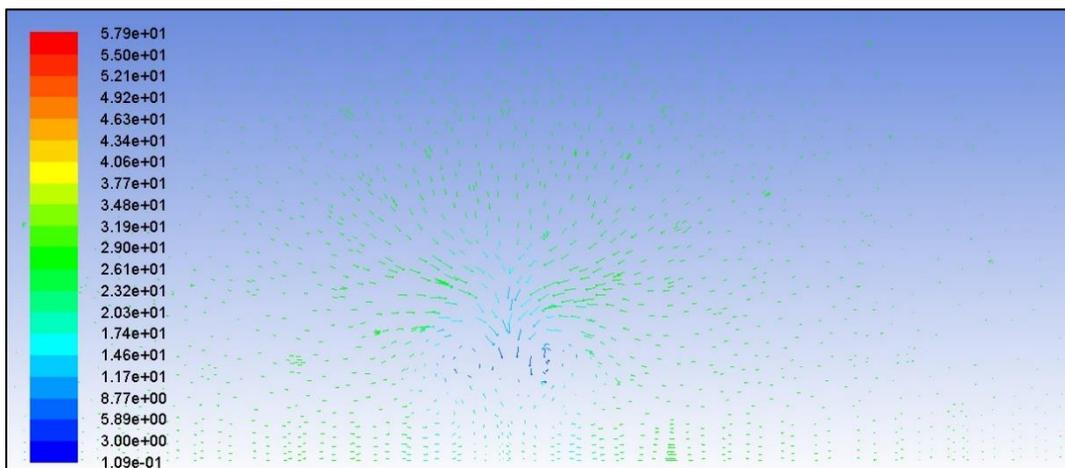
Contorno de presión en plano YZ. Color representa presión estática (Pa).



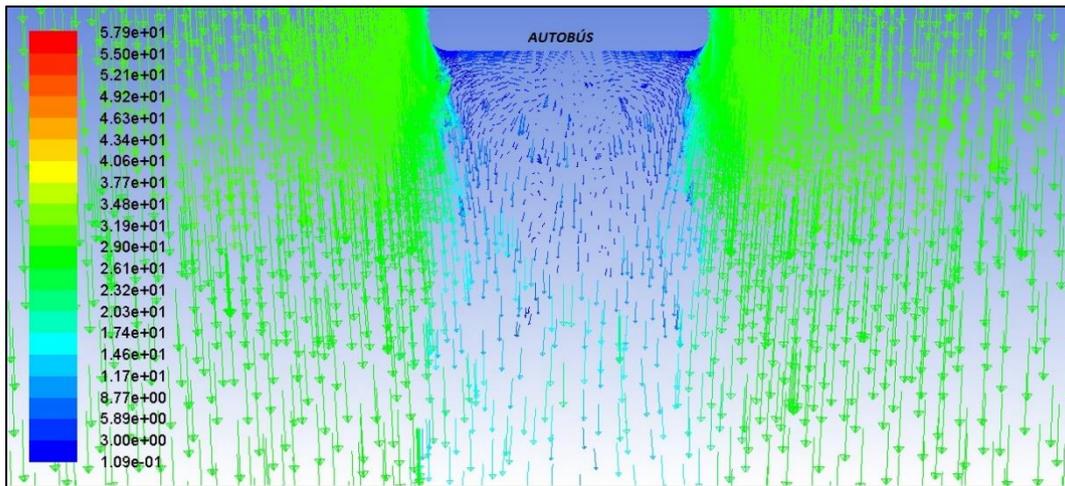
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



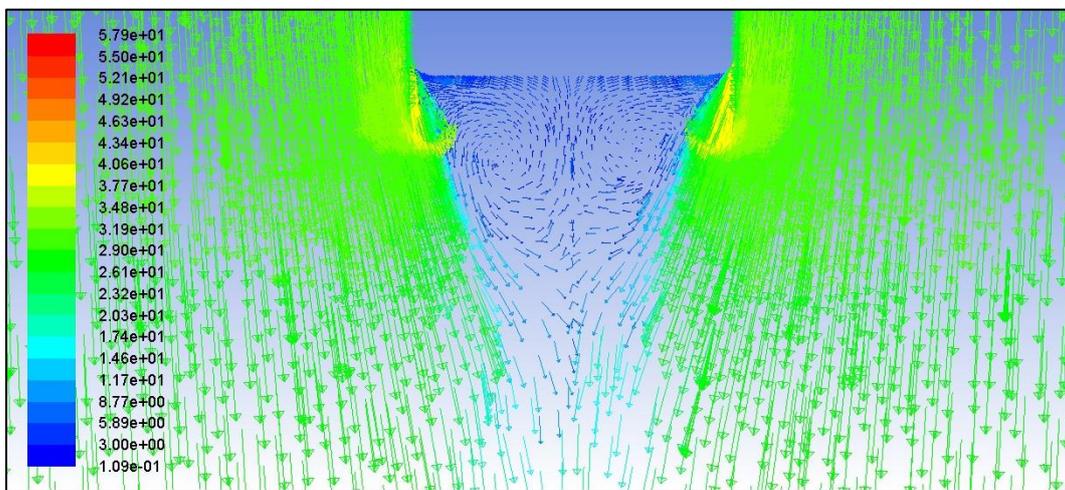
Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).



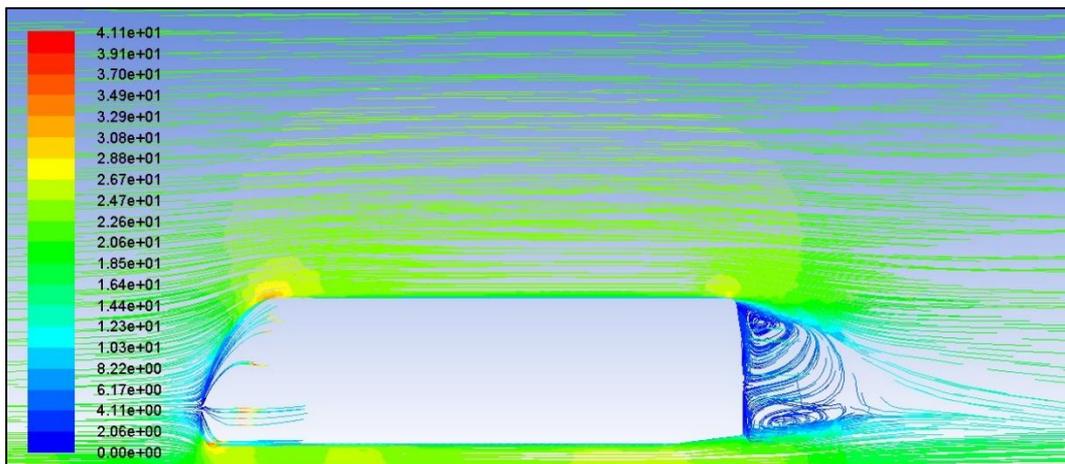
Gráfica vectorial de velocidad a 5 metros de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).



Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la carretera. Color velocidad (m/s).



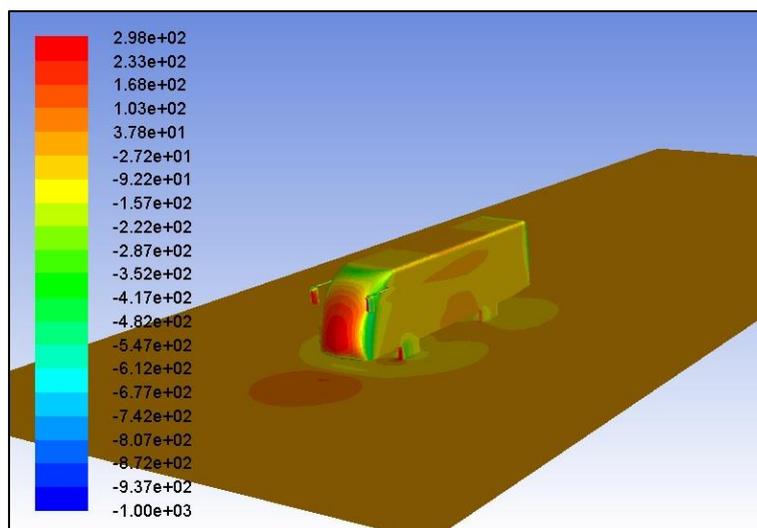
Gráfica vectorial de velocidad a 3 metros de la carretera. Color velocidad (m/s).

**Modelo 2. Información gráfica a 28 (m/s)**

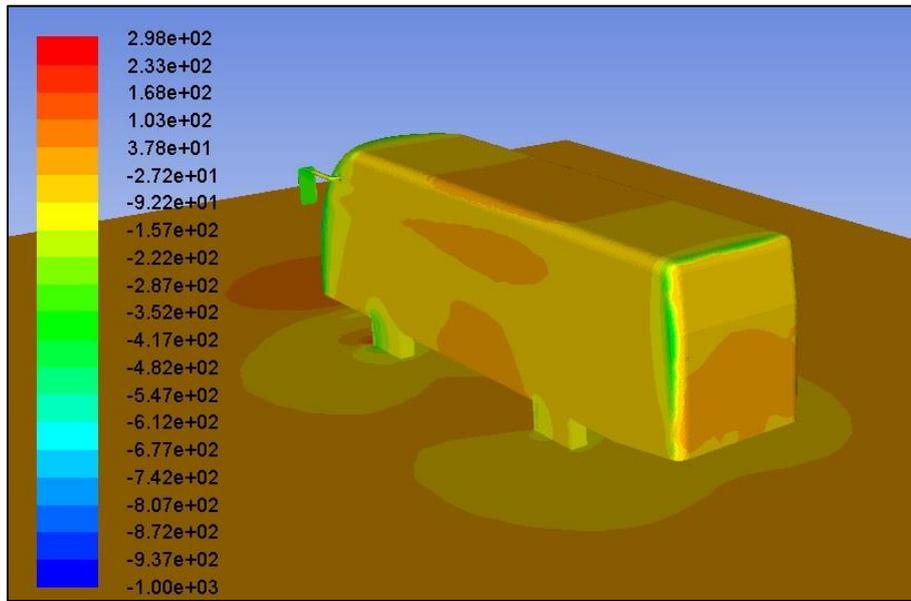
Líneas de corriente en plano YZ. Color representa velocidad (m/s).



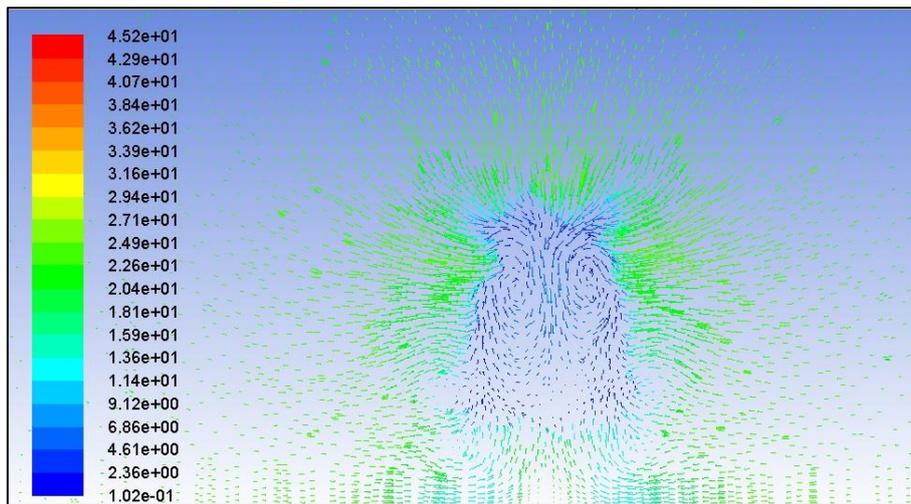
Contorno de presión en plano YZ. Color representa presión estática (Pa).



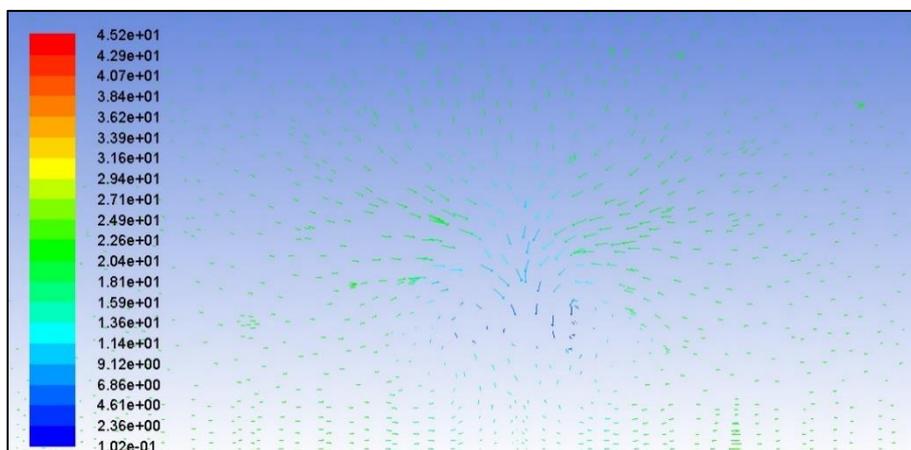
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



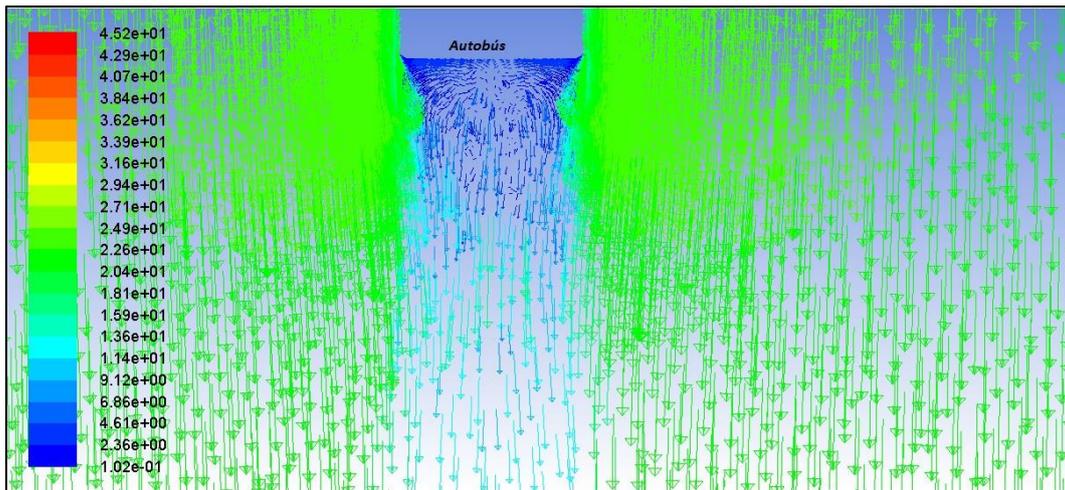
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



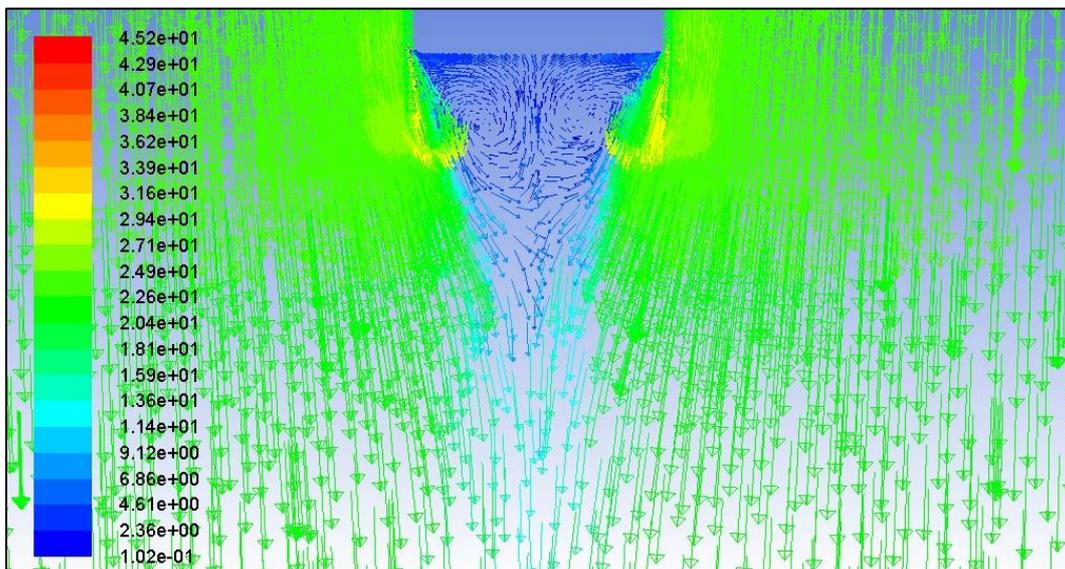
Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).



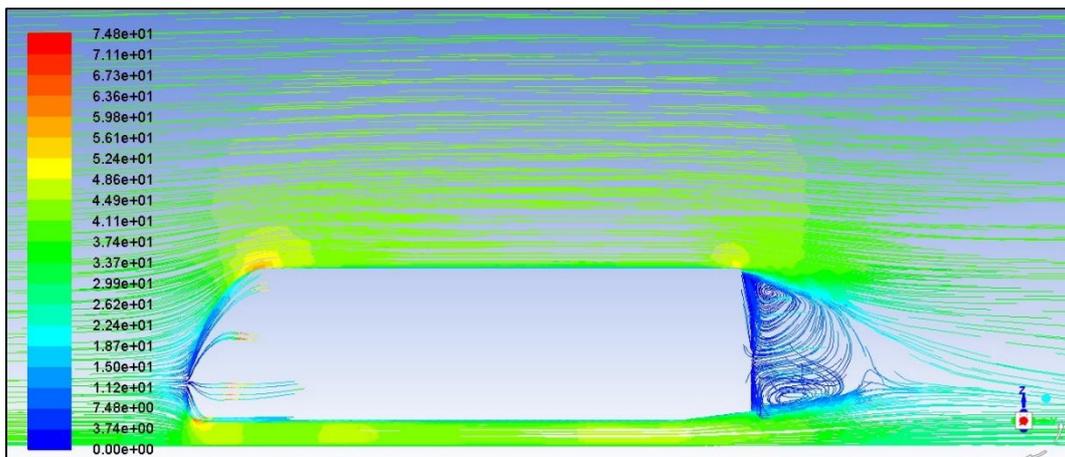
Gráfica vectorial de velocidad a 5 metros de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).



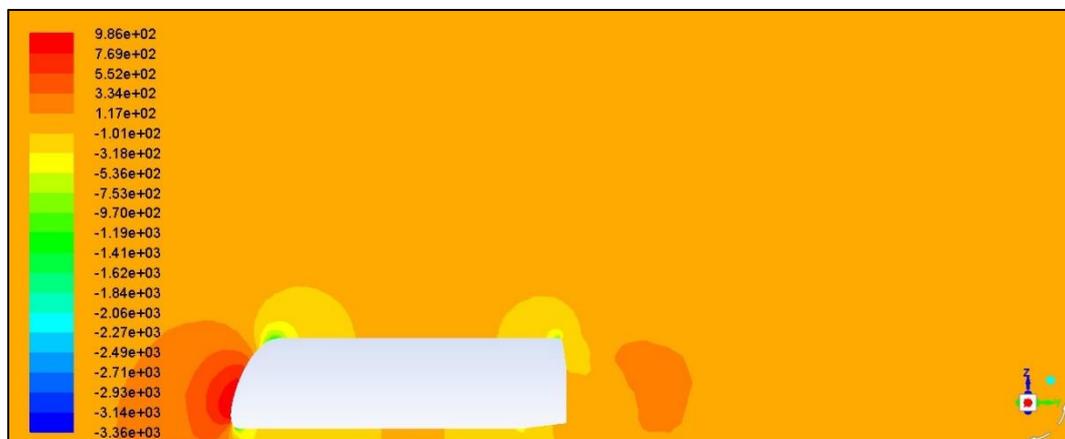
Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la carretera. Color velocidad (m/s).



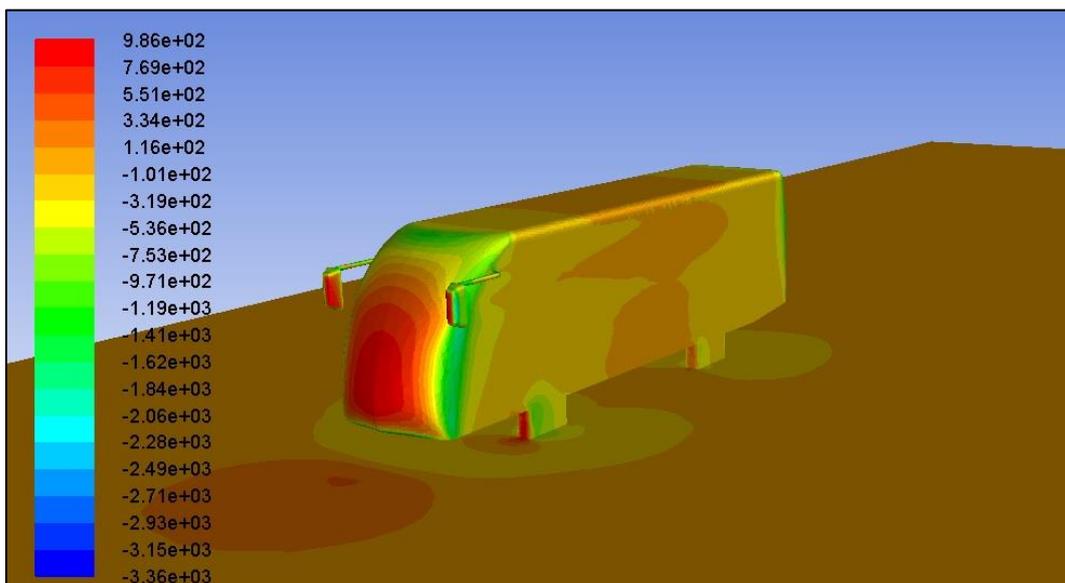
Gráfica vectorial de velocidad a 3 metros de la carretera. Color velocidad (m/s).

**Modelo 2. Información gráfica a 22 (m/s)**

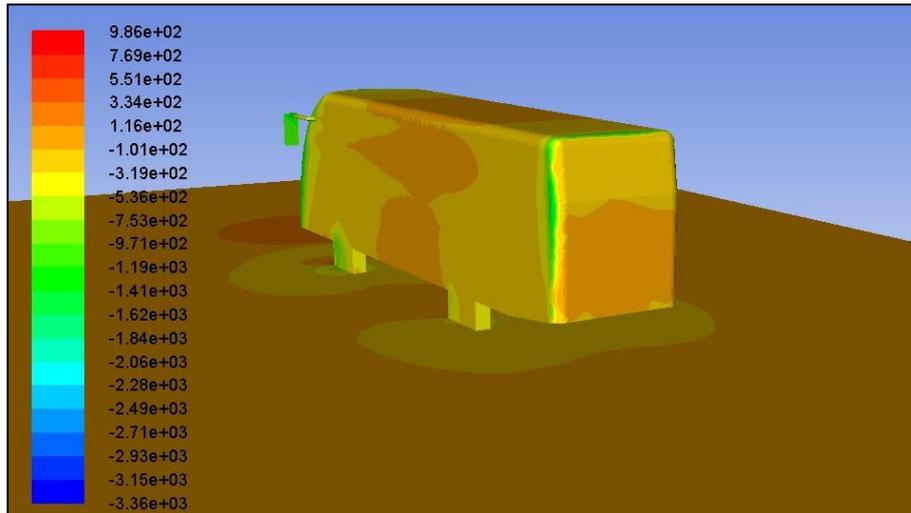
Líneas de corriente en plano YZ. Color representa velocidad (m/s).



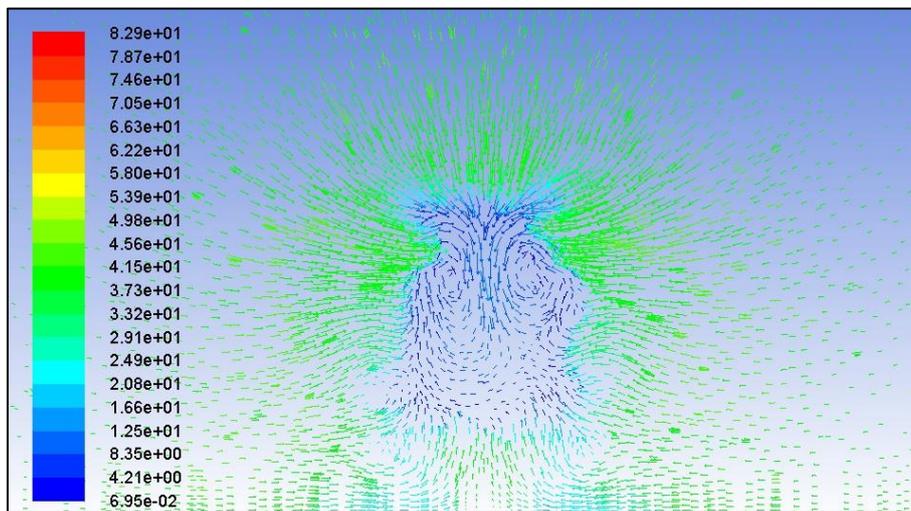
Contorno de presión en plano YZ. Color representa presión estática (Pa).



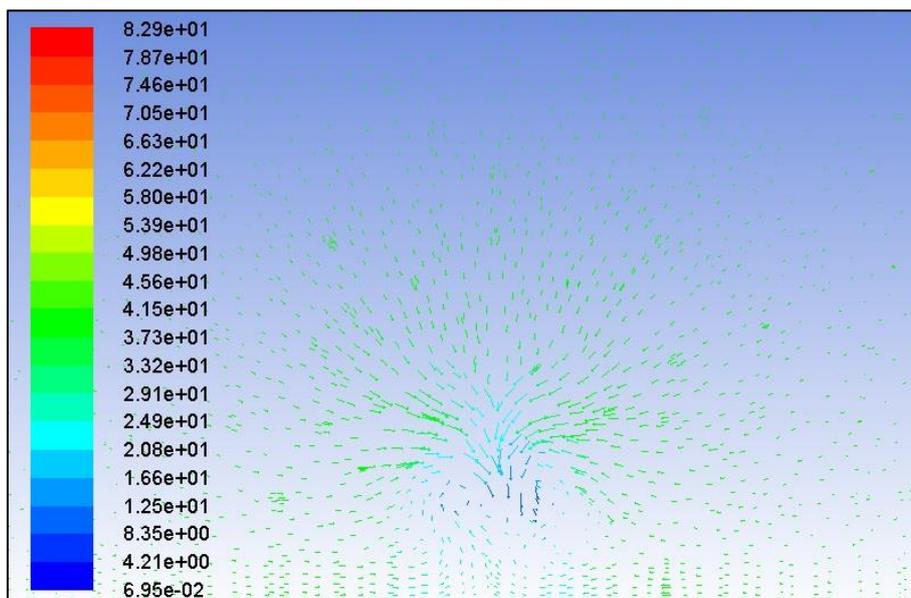
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



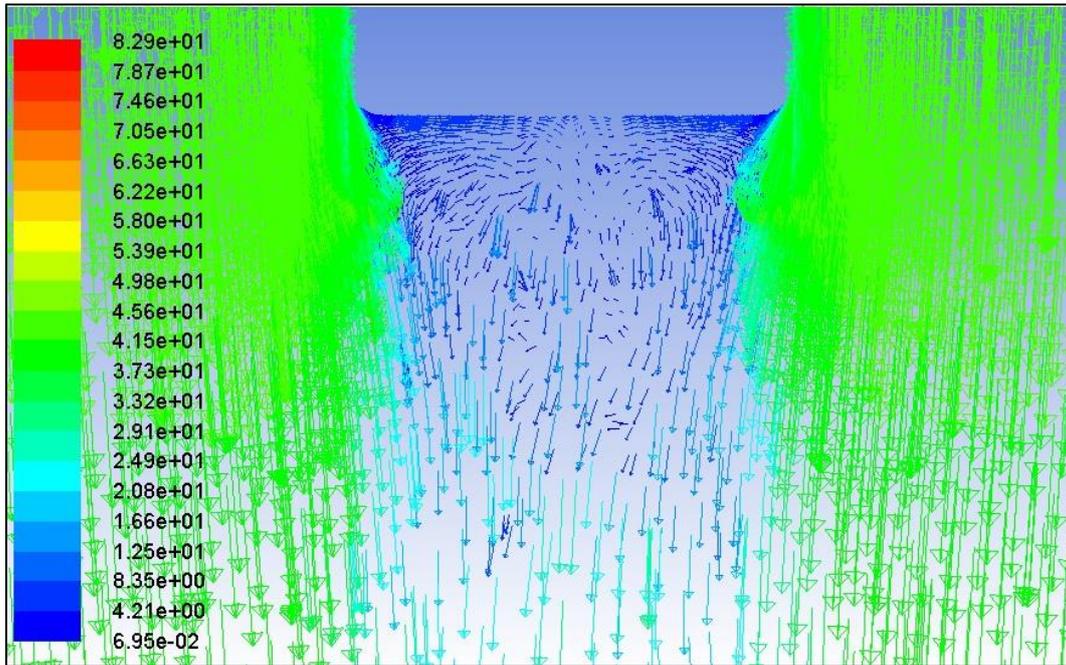
Mapa de presión sobre carrocería del autobús. Color representa presión estática (Pa).



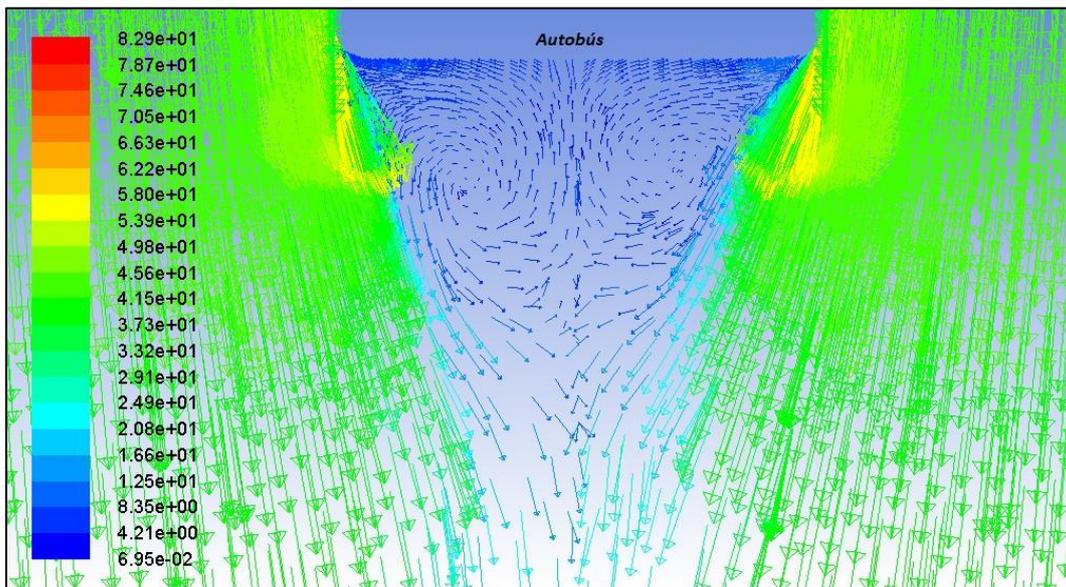
Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).



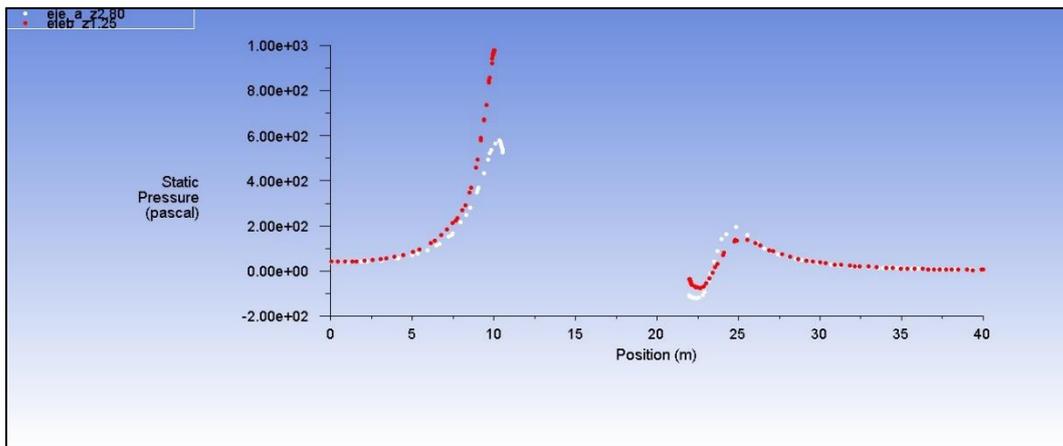
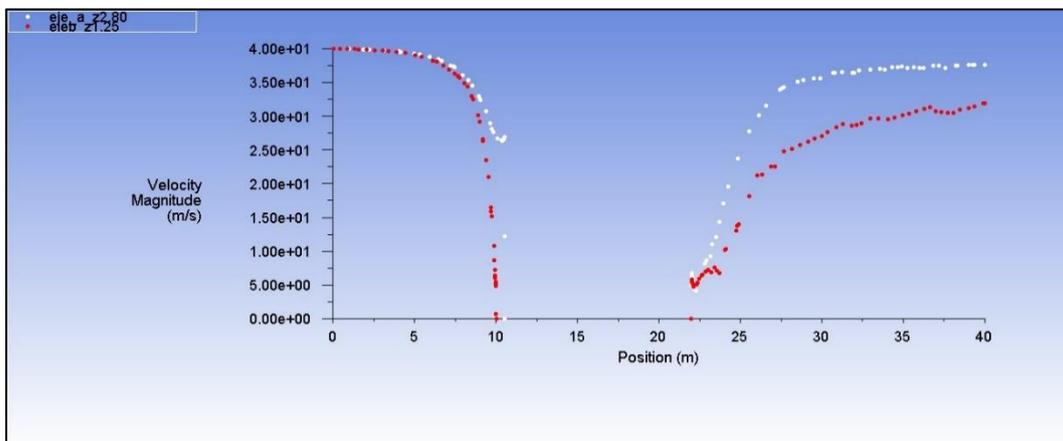
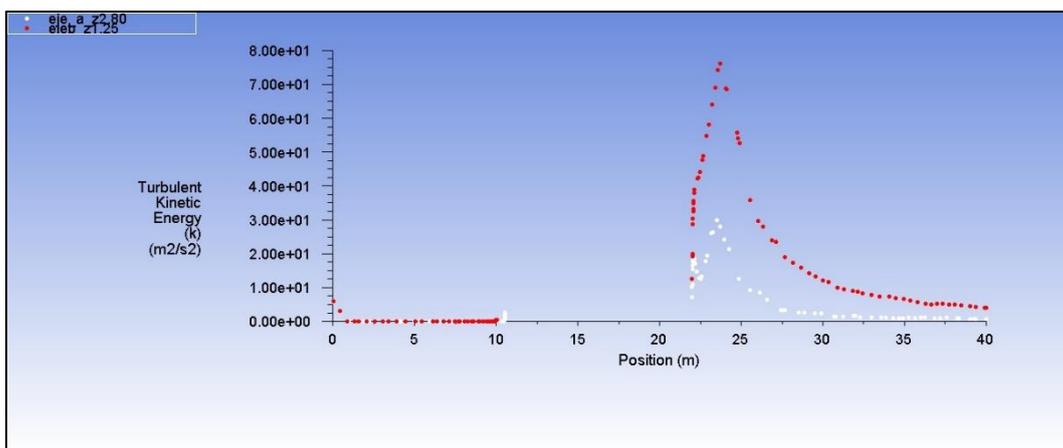
Gráfica vectorial de velocidad a 5 metros de la trasera del autobús. Color velocidad (m/s).

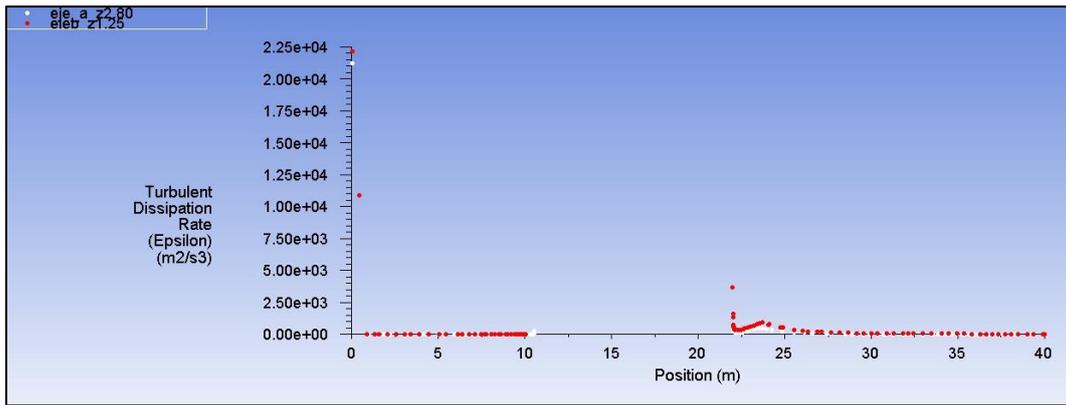


Gráfica vectorial de velocidad a 1 metro de la carretera. Color velocidad (m/s).

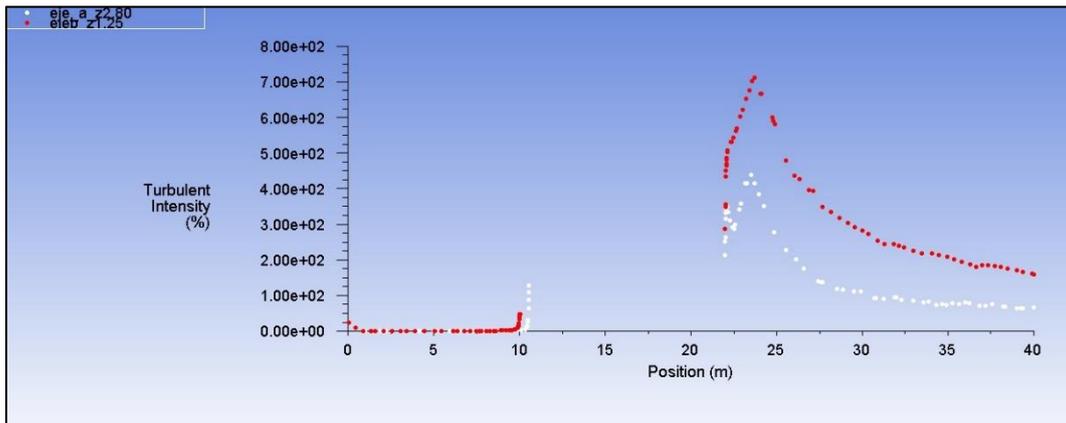


Gráfica vectorial de velocidad a 3 metros de la carretera. Color velocidad (m/s).

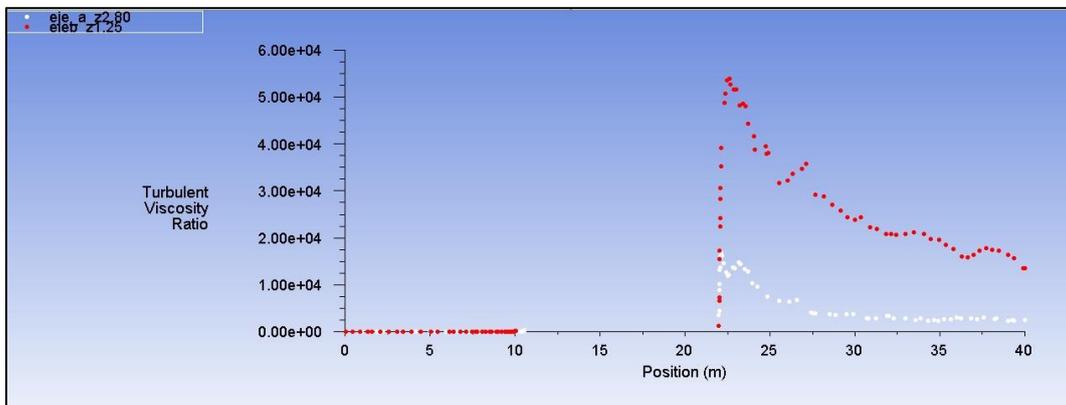
**Modelo 2; (40m/s)**Presión estática en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (Pa)Magnitud de velocidad en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (m/s)Energía Cinética turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)



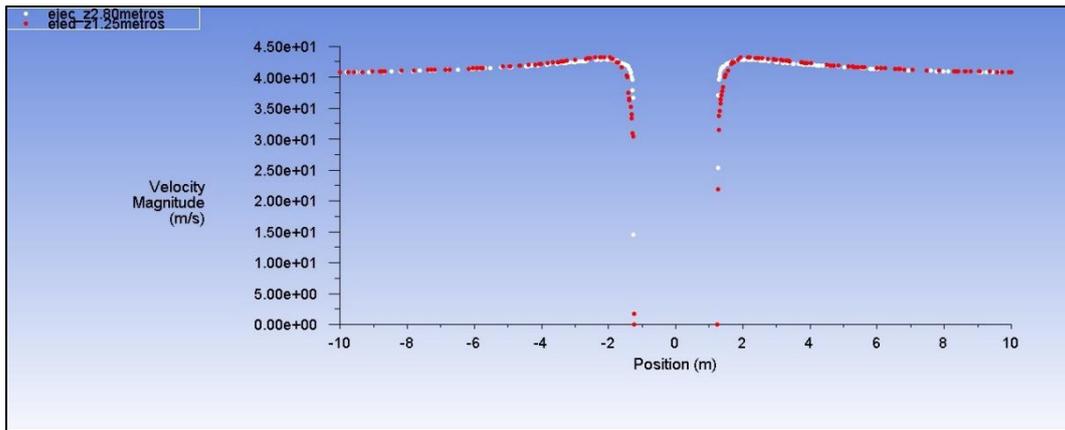
Tasa de disipación turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . ( $m^2/s^3$ )



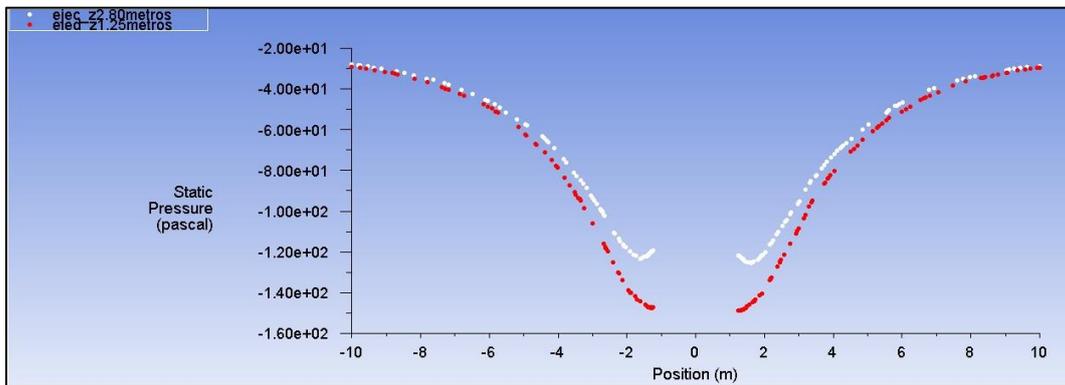
Intensidad turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (%)



Tasa de viscosidad turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ .

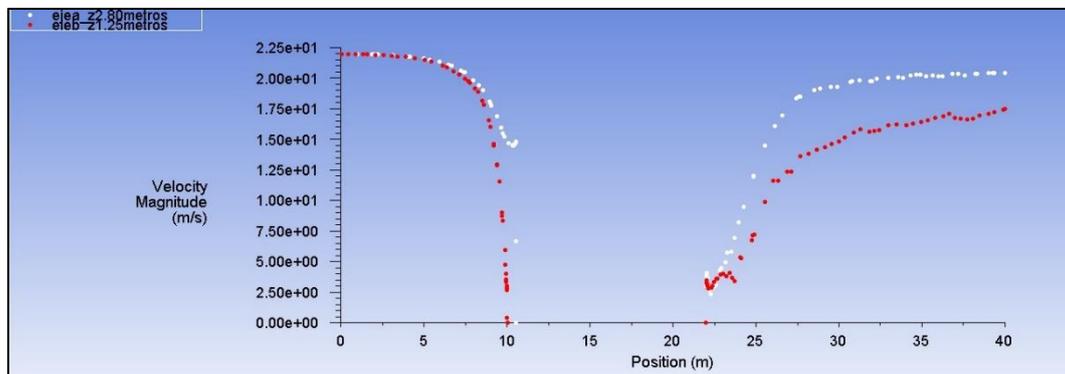


Velocidad en ejes x; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $y=0$ . (m/s)

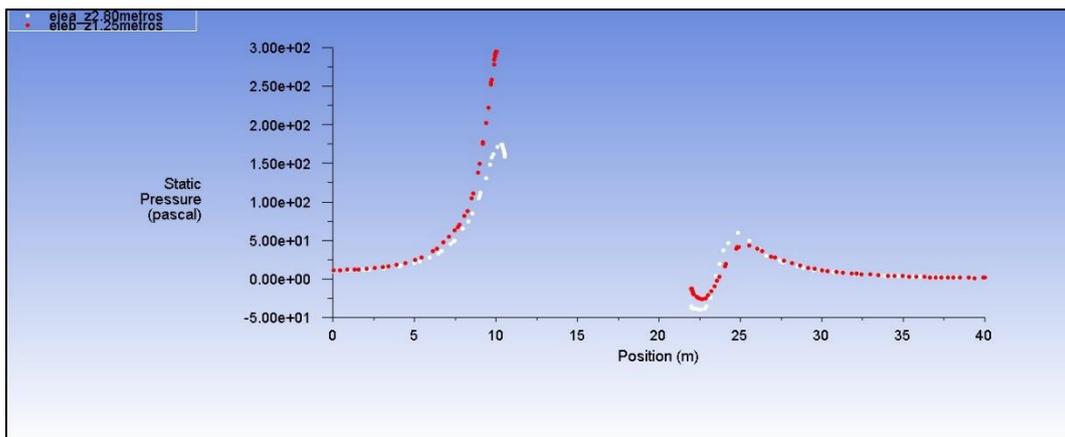
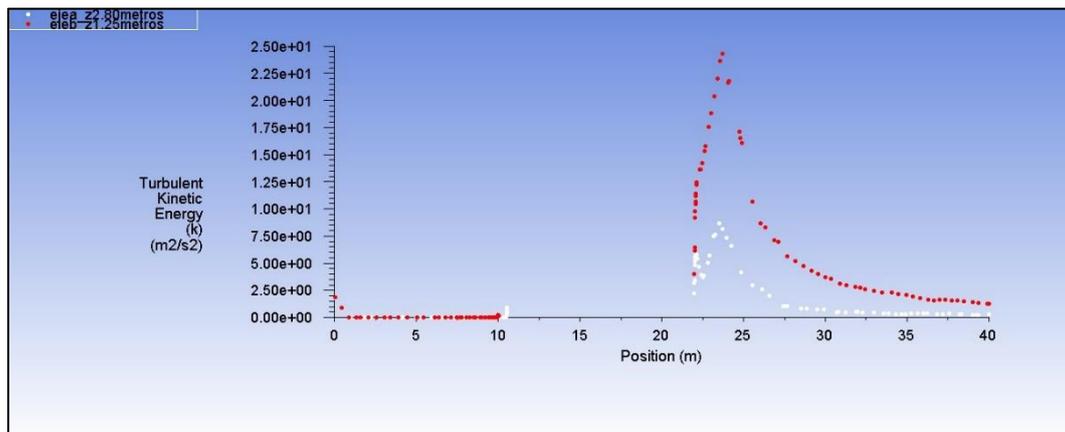
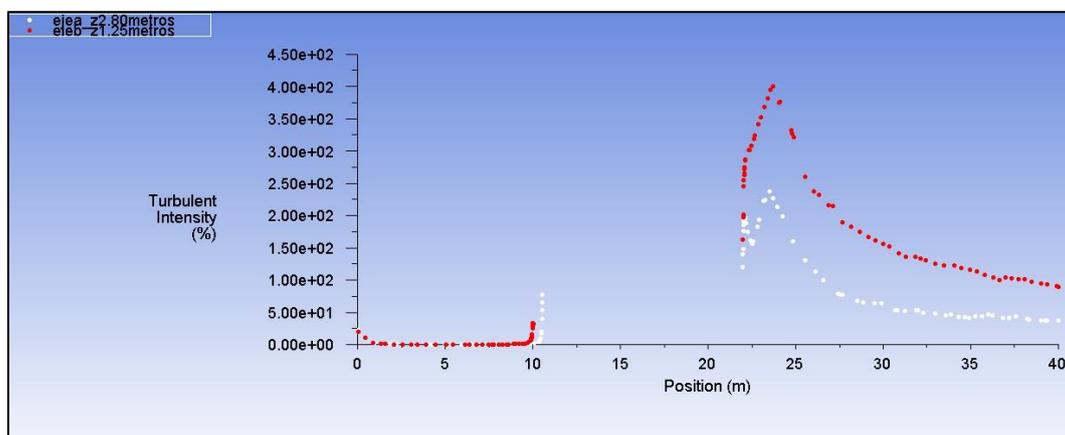


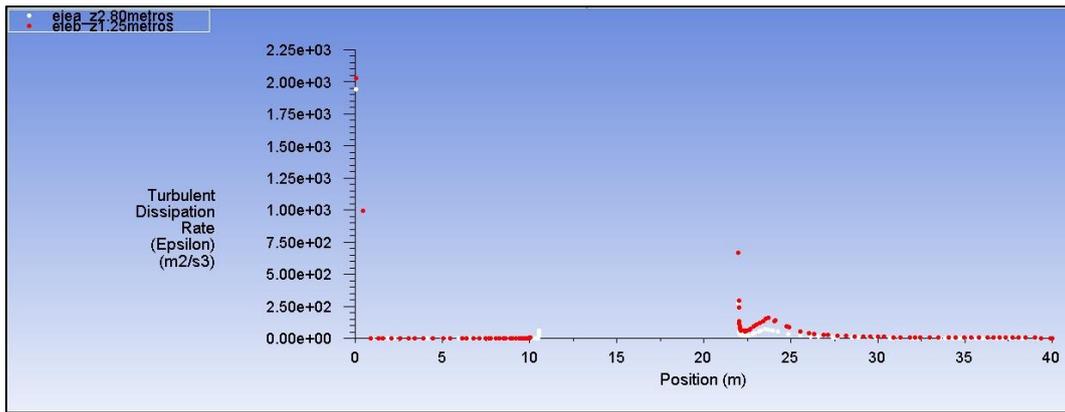
Presión estática en ejes x; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $y=0$ . (Pa)

**Modelo 2; (m/s)**

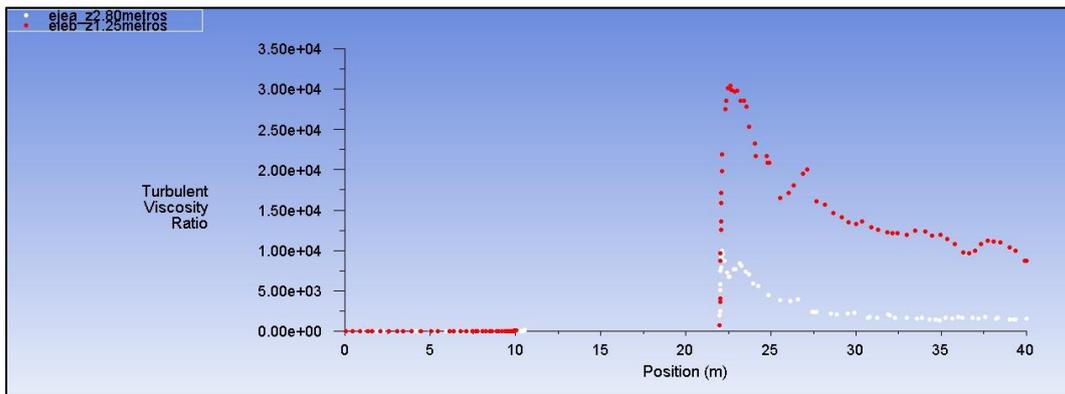


Velocidad en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (m/s)

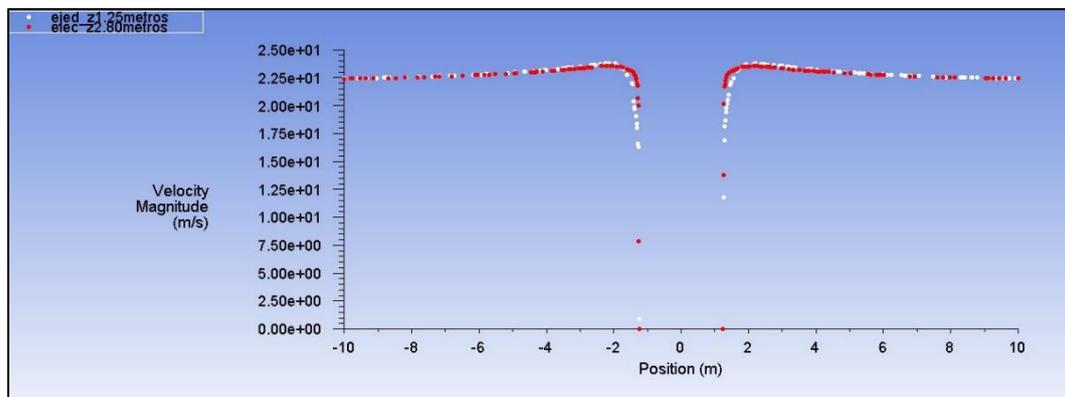
Presión estática en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (Pa)Energía cinética turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>)Intensidad turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . (%)



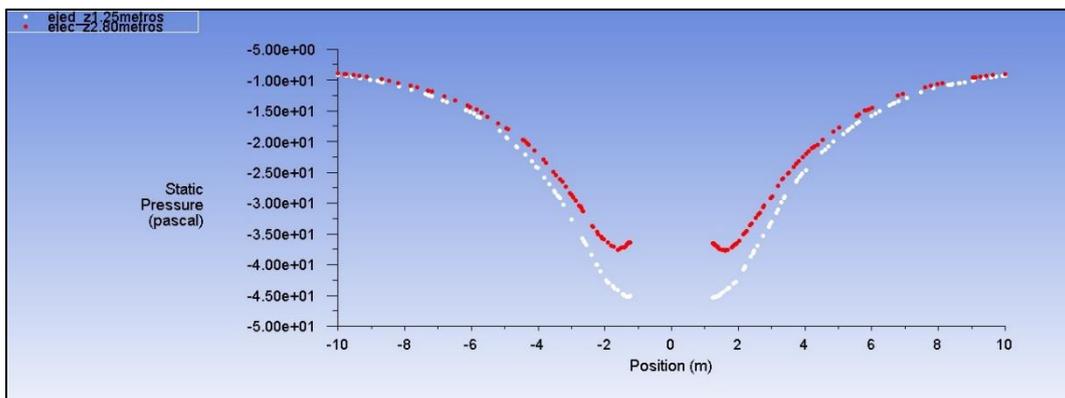
Tasa de disipación turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ . ( $m^2/s^3$ )



Tasa de viscosidad turbulenta en ejes y; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $x=0$ .



Velocidad en ejes x; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $y=0$ . (m/s)



Presión estática en ejes x; con  $z=2.80$  y  $z=1.25$ ;  $y=0$ . (Pa)

