



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Análisis comparativo de las prestaciones aerodinámicas en
un sistema Hyperloop según ratio de bloqueo vehículo-
conducto

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Meiad Thanoon, Omar

Tutor/a: Navarro García, Roberto

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial**

**Análisis comparativo de las prestaciones aerodinámicas en un
sistema Hyperloop según ratio bloqueo vehículo-conducto**

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Meiad Thanoon, Omar

Tutor/a: Navarro García, Roberto

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024



AGRADECIMIENTOS

Antes de comenzar, me gustaría mostrar mi más sentido agradecimiento:

A mis tutores Roberto y Borja, por su dedicación y paciencia en cada paso del camino. Gracias por la confianza depositada en mí y por vuestra guía y apoyo constante.

A mis padres, porque habéis sido los artificios de todo lo que soy hoy en día. Gracias por los valores que me habéis inculcado y por educarme desde el respeto y el amor siempre. Gracias por motivarme, consolarme y, sobre todo, quererme, me habéis ayudado a tener un claro ejemplo de lo que quiero llegar a ser en la vida. Necesitaría una eternidad para poder agradecer todo lo que habéis hecho por mí.

A mis hermanas, porque sois el mejor regalo que mamá y papá me han podido dar. Gracias por buscar siempre lo mejor para mí y por guiarme por el camino correcto en todo momento. Siempre habéis conseguido darme esa luz al final del túnel y levantarme en cada tropiezo. Porque la vida a vuestro lado es un viaje lleno de inspiración y crecimiento, gracias.

A Jacobo, porque más que un amigo, formas parte de mi familia. Gracias por enseñarme lo que es una verdadera amistad, real y sincera, escuchándome y apoyándome en cada momento para que no desistiese. Gracias por ser mi compañero en mis mayores pasiones y por nunca dejarme solo.

A Diego, por ser mi apoyo más incondicional en la carrera y la amistad más pura que me llevo de esta etapa que cerramos. Gracias por los interminables días de biblioteca y el apoyo constante, has hecho que este último año sea inigualable.

Y, por último, a Vega, por caminar a mi lado, dándome aliento y fuerza en cada obstáculo que se interponía por el camino. Jamás olvidaré tu comprensión y protección inquebrantable, has sido mi guía y refugio en todo momento. Gracias, porque tu presencia ha sido un espejo que refleja lo mejor de mí.



RESUMEN

Los sistemas Hyperloop han generado grandes expectativas, prometiendo revolucionar el transporte y competir con los vuelos cortos gracias a su velocidad, eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, replicar las condiciones operativas reales del Hyperloop (cápsulas presurizadas desplazándose por tubos de vacío parcial) es un reto considerable, por lo que la investigación requiere el uso de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en STAR-CCM+. El propósito es evaluar cómo afectan las variaciones en el ratio de bloqueo y las velocidades de entrada a la eficiencia y la operatividad del sistema, analizando su rendimiento mediante parámetros aerodinámicos y patrones de flujo en diferentes configuraciones geométricas. Además, se explorará cómo la velocidad inducida por el movimiento del vehículo dentro del túnel impacta la velocidad percibida y otros factores críticos. El objetivo final es comprender a fondo el rendimiento del Hyperloop bajo distintas condiciones operativas para identificar qué elementos de las simulaciones son transferibles a sistemas en vacío, asegurando su aplicabilidad y efectividad

Palabras Clave: Hyperloop; CFD; STAR-CCM+; blockage ratio; velocidad inducida; flujo confinado; flujo libre



ABSTRACT

Hyperloop systems have generated high expectations, promising to revolutionize transportation and compete with short-haul flights due to their speed, efficiency, and sustainability. However, replicating the real operational conditions of the Hyperloop (pressurized capsules moving through partially vacuumed tubes) is a considerable challenge, which is why research requires the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations in STAR-CCM+. The purpose is to evaluate how variations in blockage ratio and inlet speeds affect the efficiency and operability of the system, analyzing its performance through aerodynamic parameters and flow patterns in different geometric configurations. Additionally, it will explore how the speed induced by the vehicle's movement within the tunnel impacts the perceived speed and other critical factors. The ultimate goal is to thoroughly understand the performance of the Hyperloop under various operational conditions to identify which elements of the simulations are transferable to vacuum systems, ensuring their applicability and effectiveness.

Keywords: Hyperloop; CFD; STAR-CCM+; blockage ratio; induced speed; confined flow; free flow



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 INTRODUCCIÓN AL HYPERLOOP	13
1.2 MARCO TEÓRICO Y FUNCIONAMIENTO	14
1.2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS	14
1.2.2 COMPONENTES DEL SISTEMA	14
1.2.3 VENTAJAS TÉCNICAS	15
1.3 DESARROLLO DEL HYPERLOOP	16
1.3.1 PRINCIPALES EMPRESAS Y PROYECTOS	16
1.3.2 AVANCES TECNOLÓGICOS E HITOS	17
1.3.3 NORMATIVAS E INTEGRACIÓN DE INFRAESTRUCTURA	17
1.4 PERSPECTIVAS FUTURAS	18
1.1 MOTIVACIÓN	19
1.1 LITERATURA ANTERIOR	20
1.2 OBJETIVOS	21
2. METODOLOGÍA	23
2.1 MODELO GEOMÉTRICO	23
2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DOMINIO	23
2.1.2 TIPOS DE GEOMETRÍA	24
2.2 ESTRATEGIA DE MALLADO	25
2.2.1 MALLADO CASO BASE (BR1)	26
2.2.1.1 Mallado Base	26
2.2.1.2 Mallado Zonas de Interés	28
2.2.2 ADAPTACIONES MALLADO CASO 2	32
2.2.2.1 Variación Controles Mallado	32
2.2.2.2 Escenas de Mallado	33
2.2.3 ADAPTACIONES MALLADO CASO 3	34
2.2.3.1 Variación Controles de Cápsula	34
2.2.3.2 Escenas Mallado	34
2.3 MODELADO FÍSICO DE LAS SIMULACIONES	35
2.4 CONDICIONES DE CONTORNO	38
2.4.1 CONDICIONES DE SIMETRÍA	39
2.4.2 CONDICIONES DE ENTRADA (INLET)	39
2.4.3 CONDICIONES DE PARED (WALL) / CÁPSULA (POD)	39
2.4.4 CONDICIONES DE SALIDA (OUTLET)	40
3. RESULTADOS	41
3.1 CONFIGURACIÓN DE LOS CASOS	41
3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO APQSS	41
3.1.2 VELOCIDAD INDUCIDA	42



3.1.2.1	Cálculo Velocidad Inducida.....	42
3.1.3	CONFIGURACIÓN FINAL	43
3.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
3.2.1	ANÁLISIS CASO BASE (125 m/s)	45
3.2.1.1	Número de Mach	45
3.2.1.2	Velocidad Inducida.....	48
3.2.1.3	Presión Absoluta	49
3.2.1.4	Resistencia Aerodinámica	50
3.2.2	ANÁLISIS CASO VELOCIDAD BAJA (100 m/s)	51
3.2.2.1	Número de Mach	51
3.2.2.2	Velocidad Inducida.....	53
3.2.2.3	Presión Absoluta	53
3.2.2.4	Resistencia Aerodinámica	55
3.2.3	ANÁLISIS CASO VELOCIDAD ALTA (150 m/s)	56
3.2.3.1	Caso Ratio de Bloqueo 1.....	56
3.2.3.2	Caso Ratio de Bloqueo 2.....	57
3.2.3.3	Caso Ratio de Bloqueo 3.....	59
4.	CONCLUSIONES	64
4.1	COMPARATIVA DE CONDICIONES ABIERTAS Y CERRADAS	64
4.2	CONCLUSIÓN INTEGRADA SOBRE VARIACIÓN VELOCIDAD DE ENTRADA E INDUCIDA	65
4.2.1	<i>IMPACTO VARIACIÓN VELOCIDAD DE ENTRADA</i>	65
4.2.2	<i>EFFECTOS VELOCIDAD INDUCIDA</i>	65
4.3	ALINEACIÓN CON PRUEBAS REALES	66
5.	APORTACIONES CLAVE DEL ESTUDIO	67
6.	PROPUESTAS DE MEJORA Y FUTUROS TRABAJOS	68
7.	PRESUPUESTO	70
7.1	COSTES DIRECTOS	70
7.2	COSTES INDIRECTOS (16% SOBRE COSTES DIRECTOS)	71
7.3	BENEFICIO	71
7.4	IVA	71
7.5	PRESUPUESTO FINAL	71
8.	ODS	72
9.	BIBLIOGRAFÍA	73
10.	PLIEGO DE CONDICIONES	76

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Diseño Conceptual Hyperloop Alpha.....	13
Ilustración 1-2: Tren de Levitación Magnética de Alta Velocidad de origen chino	14
Ilustración 1-3: Diseño Conceptual Cápsula en Hyperloop Alpha	15
Ilustración 1-4: Centro de pruebas de Virgin Hyperloop.....	16
Ilustración 1-5: Cápsula a escala diseñada por Hyperloop	16
Ilustración 1-6: Integración de paneles solares en conductos Hyperloop	18
Ilustración 2-1: Dimensiones Sistema de Estudio.....	24
Ilustración 2-2: Geometría Ratio Bloqueo 1	25
Ilustración 2-3: Geometría Ratio Bloqueo 2	25
Ilustración 2-4: Geometría Ratio Bloqueo 3	25
Ilustración 2-5: Representación Mallado Base en Sistema Completo (BR1)	28
Ilustración 2-6: Mallado Base (BR1)	28
Ilustración 2-7: Representación Mallado Cápsula en Sistema Completo (BR1)	29
Ilustración 2-8: Mallado Alrededor de Cápsula (BR1)	30
Ilustración 2-9: Representación Mallado Estela en Sistema Completo (BR1)	31
Ilustración 2-10: Mallado Estela (BR1)	31
Ilustración 2-11: Representación Mallado Base (BR2).....	33
Ilustración 2-12: Representación Mallado Cápsula (BR2)	33
Ilustración 2-13: Representación Mallado Estela (BR2).....	33
Ilustración 2-14: Representación Mallado Base (BR3).....	34
Ilustración 2-15: Representación Mallado Cápsula (BR2)	35
Ilustración 2-16: Representación Mallado Estela (BR2).....	35
Ilustración 2-17: Eje de Simetría en Sistema Completo	36
Ilustración 2-18: Capa Límite Superficie	37
Ilustración 2-19: Condiciones de Contorno	38
Ilustración 3-1: Evolución Número Mach (BR1/125).....	45
Ilustración 3-2: Evolución Líneas de Corriente (BR1/125)	45
Ilustración 3-3: Evolución Mach en Dirección X (BR1/125)	46
Ilustración 3-4: Evolución Número Mach (BR2/125).....	46
Ilustración 3-5: Evolución Número Mach (BR3/125).....	46
Ilustración 3-6: Evolución Líneas de Corriente (BR2/125)	47
Ilustración 3-7: Evolución Líneas de Corriente (BR3/125)	47
Ilustración 3-8: Evolución Mach en Dirección X (BR2, BR3/125).....	48
Ilustración 3-9: Evolución Presión Absoluta (BR1/125)	49
Ilustración 3-10: Evolución Presión Absoluta (BR2/125)	50
Ilustración 3-11: Evolución Presión Absoluta (BR3/125)	50
Ilustración 3-12: Evolución Número Mach (BR1/100).....	52
Ilustración 3-13: Evolución Número Mach (BR2/100).....	52
Ilustración 3-14: Evolución Número Mach (BR3/100).....	52
Ilustración 3-15: Evolución Presión Absoluta (BR1/100)	54
Ilustración 3-16: Evolución Presión Absoluta (BR2/100)	54
Ilustración 3-17: Evolución Presión Absoluta (BR3/100)	54
Ilustración 3-18: Evolución Número Mach (BR1/150).....	56
Ilustración 3-19: Evolución Número Mach (BR2/150).....	57
Ilustración 3-20: Evolución Presión Absoluta (BR2/150)	58
Ilustración 3-21: Evolución Número Mach (BR3/150) Estático.....	59
Ilustración 3-22: Evolución Número Mach (BR3/150) Transitorio.....	60
Ilustración 3-23: Evolución Presión Absoluta (BR3/150) Transitorio.....	60



Ilustración 3-24: Gráfico Salto Presión vs Velocidad Entrada	62
Ilustración 3-25: Gráfico Drag vs Velocidad Entrada.....	62
Ilustración 3-26: Gráfico CD vs Velocidad Entrada	62
Ilustración 3-27: Velocidad Entrada Teórica vs Real	63



LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1: Condiciones Geométricas de Casos de Estudio.....	25
Tabla 2-2: Formato de Mallado General	26
Tabla 2-3: Controles Mallado Caso Base.....	27
Tabla 2-4: Controles Mallado Cápsula (BR1).....	29
Tabla 2-5: Controles Mallado Estela (BR1).....	31
Tabla 2-6: Variaciones Controles Caso 2.....	32
Tabla 2-7: Variaciones Controles Caso 3.....	34
Tabla 2-8: Modelos Físicos Seleccionados	38
Tabla 3-1: Condiciones Operativas Casos 1,2 y 3	44
Tabla 3-2: Valores Corrección Velocidad Inducida a 125 m/s	48
Tabla 3-3: Valores Salto Presión a (BR1/125).....	49
Tabla 3-4: Valores Salto Presión (BR2, BR3/125)	50
Tabla 3-5: Valores Resistencia a 125 m/s	51
Tabla 3-6: Valores Corrección Velocidad Inducida a 100 m/s	53
Tabla 3-7: Valores Salto Presión (BR1/100).....	54
Tabla 3-8: Valores Salto Presión (BR2, BR3/125)	55
Tabla 3-9: Resistencia a 125 m/s.....	55
Tabla 3-10: Valores Corrección Velocidad Inducida (BR2/150).....	57
Tabla 3-11: Valores Salto Presión (BR2/150).....	58
Tabla 3-12: Valores Resistencia (BR2/150).....	58
Tabla 3-13: Valores Salto de Presión y Resistencia (BR3/150).....	60
Tabla 3-14: Resultados de cada Sistema de Estudio	61



LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Blockage Ratio.....	24
Ecuación 3-1: Corrección Velocidad Entrada.....	42
Ecuación 3-2: Corrección Presión Salida.....	43
Ecuación 3-3: Corrección Temperatura Entrada.....	43

NOMENCLATURAS

ABREVIATURAS

<i>BR</i>	<i>Blockage Ratio</i>	[–]
<i>BR1</i>	<i>Blockage Ratio Caso 1</i>	[–]
<i>BR2</i>	<i>Blockage Ratio Caso 2</i>	[–]
<i>BR3</i>	<i>Blockage Ratio Caso 3</i>	[–]
<i>APQSS</i>	<i>Modelo A Priori Quasi Steady State</i>	[–]

SÍMBOLOS LATINOS

$L_{cápsula}$	<i>Longitud Capsula</i>	[m]
$L_{túnel}$	<i>Longitud Tunel</i>	[m]
L_{aguas_abajo}	<i>Longitud Aguas Abajo</i>	[m]
L_{aguas_arriba}	<i>Longitud Aguas Arriba</i>	[m]
$D_{capsula}$	<i>Diametro Seccion Capsula</i>	[m]
$D_{conducto}$	<i>Diametro Seccion Conducto</i>	[m]
$R_{capsula}$	<i>Radio Seccion Capsula</i>	[m]
$R_{conducto}$	<i>Radio Seccion Conducto</i>	[m]
$A_{capsula}$	<i>Area Seccion Capsula</i>	[m ²]
$A_{conducto}$	<i>Area Seccion Conducto</i>	[m ²]
V_{inlet}	<i>Velocidad Entrada Sistema</i>	[$\frac{m}{s}$]
V_{wall}	<i>Velocidad Pared Sistema</i>	[$\frac{m}{s}$]
P_{outlet}	<i>Presion Salida Sistema</i>	[Pa]
P_{ini}	<i>Presion Inicial Proceso Iterativo</i>	[Pa]
T_{inlet}	<i>Temperatura Entrada Sistema</i>	[K]



T_{ini}	<i>Temperatura Inicial Proceso Iterativo</i>	[K]
ΔP	<i>Salto Presion Inlet – Oultet</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR1/125}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR1 a 125 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR2/125}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR2 a 125 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR3/125}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR3 a 125 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR1/100}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR1 a 100 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR2/100}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR2 a 100 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR3/100}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR3 a 100 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR2/150}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR2 a 150 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
$\Delta P_{BR3/150}$	<i>Salto Presion Inlet – Oultet Caso BR3 a 150 $\frac{m}{s}$</i>	[Pa]
C_D	<i>Coficiente Resistencia Aerodinamica</i>	[-]
a	<i>Velocidad Sonido</i>	$\left[\frac{m}{s}\right]$

LETRAS GRIEGAS

γ	<i>Ratio Capacidades Termicas</i>	[-]
ρ	<i>Densidad</i>	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

1.INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN AL HYPERLOOP

Tras la crisis financiera del 2008, el mundo sufrió una gran recesión económica sin precedentes, lo que generó desconfianza en empresarios y una notable disminución de la inversión tanto pública como privada. Por este motivo, se hizo tan necesario estimular la creación de proyectos innovadores que ayudasen a resurgir la economía. A la par, los tiempos necesarios para recorrer una distancia dada por carretera cada vez eran mayores, fruto de la gran saturación y congestión del tráfico que se encontraba en auge. Por estos dos motivos ahora nombrados el objetivo del sector del transporte desde principios de siglo se ha focalizado en conseguir crear sistemas que permitan realizar desplazamientos de la manera más rápida y eficiente posible. Además, los vuelos cortos que se utilizan frecuentemente para cubrir estas distancias no son eficientes en términos de recursos y tiempo. Así nació Hyperloop.

Hyperloop encarna la visión de futuro imaginada por el empresario Musk, cuyo objetivo es proporcionar capacidades operativas que competirían directamente con los viajes aéreos de corta distancia [1]. La idea de Musk implica un sistema que pueda viajar a altas velocidades a una altitud equivalente al nivel del mar, lo que supondría un impacto inmediato en la forma de viajar. La visión principal del Hyperloop es reducir los tiempos de viaje, consiguiendo, por ejemplo, que un viaje en avión de 2 horas o de 7 en coche se conviertan en 30 escasos minutos. Además, otro objetivo muy presente en el desarrollo del sistema es reducir la huella de carbono al máximo, mediante el uso de energías renovables. De esta forma, se lleva a cabo una gran contribución en la mejora ambiental al caracterizarse el sistema por su gran eficiencia energética.

El concepto de Hyperloop y su funcionamiento, fue presentado por Elon Musk en agosto de 2013, a través del documento “Hyperloop Alpha” [2]. En este, se describe el Hyperloop como un sistema de transporte en el que se emplean cápsulas que viajan a través de tubos de vacío parcial usando levitación magnética. A continuación, se detallará de manera teórica como funciones del sistema:

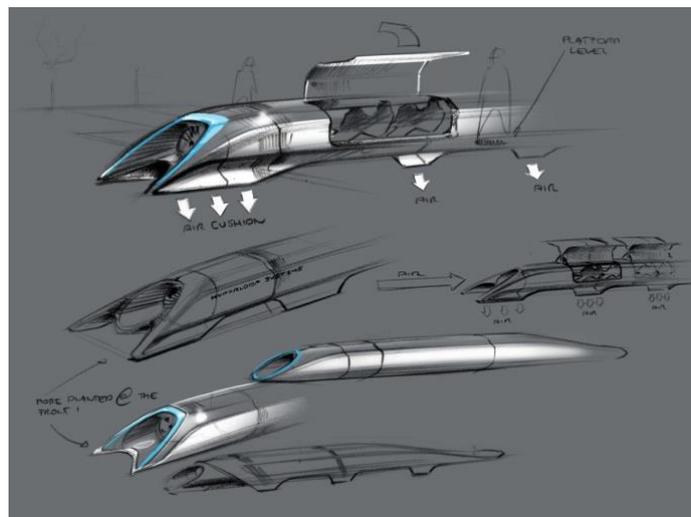


Ilustración 1-1: Diseño Conceptual Hyperloop Alpha

1.2 MARCO TEÓRICO Y FUNCIONAMIENTO

En este apartado se tratarán los principios fundamentales, los componentes de sistema y las ventajas técnicas.

1.2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS

El Hyperloop opera basándose en 2 conceptos físicos: la levitación magnética y el movimiento en un entorno de vacío parcial.

En primer lugar, el **maglev** es una forma de hacer que los automóviles se desplacen flotando, bajo la influencia de imanes, lo que elimina por completo la fricción con la superficie [3]. Para que este sistema funcione, es necesario que haya un suministro eléctrico continuo.



Ilustración 1-2: Tren de Levitación Magnética de Alta Velocidad de origen chino

El segundo componente clave del sistema implica la instalación de **tubos de vacío parcial**. La premisa consiste en expulsar la mayor parte del aire de estos conductos para crear una presión considerablemente menor que la del entorno circundante. Estos conceptos tienen un gran efecto positivo: reducir al mínimo la resistencia aerodinámica al disminuir la densidad del aire y eliminar la fricción entre el vehículo y la vía. Gracias a estas mejoras, el sistema puede alcanzar velocidades mayores a la del sonido, superando notablemente la velocidad de los trenes tradicionales y emparejándose con algunas aeronaves.

1.2.2 COMPONENTES DEL SISTEMA

Con la intención de poder conseguir el propósito del Hyperloop y permitir la concepción adecuada de los principios básicos nombrados, el sistema debe estar compuesto por varios componentes integrales [4].

- 1) **Cápsulas:** Se trata del vehículo sellado en el que viajarían los pasajeros o carga. El diseño de esta debe presentar una silueta aerodinámica, ergonómica y ligera, lo que permita maximizar la eficiencia del sistema. La estructura de esta debe ser construida entonces con materiales compuestos, tales como fibra de carbono o aleaciones de aluminio, lo que asegure resistencia a la par que un peso controlado. Una vez construida la estructura, esta debe ser equipada con:

- Sistemas de Levitación y Propulsión
- Sistemas de Control y Navegación, lo que incluye sensores y software para gestionar las condiciones operativas.
- Sistemas de Seguridad y Confort que permitan mantener condiciones de óptimas para los viajeros en la cabina.

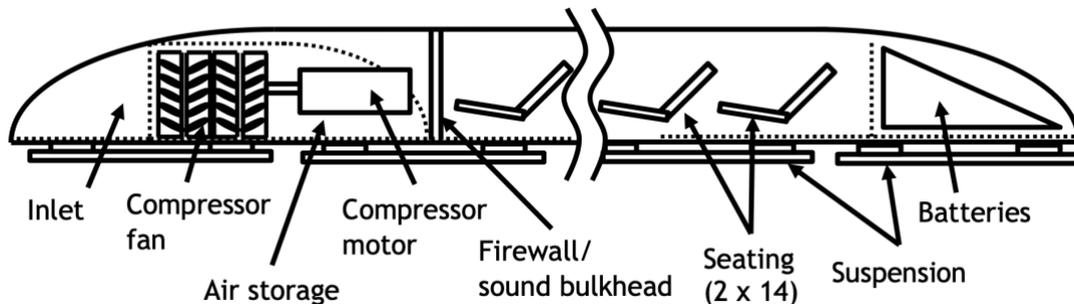


Ilustración 1-3: Diseño Conceptual Cápsula en Hyperloop Alpha

- 2) Conductos:** Estos son los tubos en los que se desplazan las cápsulas, los cuales deben construirse con materiales de alta resistencia como el acero forzado, que permiten soportar niveles extremos de presión. Para ello, deben ser equipados con bombas de vacío y sistemas controlados por válvulas que sean capaces de controlar posibles fugas. En cuanto a la sujeción de estos túneles, debido a que se conciben en un entorno exterior, deben ser soportados por pilares que permitan el movimiento sobre un terreno uniforme.
- 3) Estaciones:** Para poder afianzar una de las premisas principales del sistema como es la eficiencia, las estaciones del Hyperloop deben estar diseñadas para poder ofrecer un embarque y desembarque sencillo y de forma rápida, para así poder reducir los tiempos de viaje a meramente el desplazamiento, sin requerir excesivo tiempo anterior u posterior a este.

1.2.3 VENTAJAS TÉCNICAS

La motivación para establecer una realidad de este sistema viene impulsada por las numerosas ventajas que ofrecería. A continuación, se detallan las principales características [5]. En primer lugar, y como ya se ha comentado anteriormente, la principal finalidad del desarrollo del HyperLoop es poder conseguir velocidades supersónicas o ultrarrápidas, lo que reduciría de forma contundente el tiempo necesario para recorrer cierta distancia. Además, la propulsión se daría gracias a energía eléctrica, lo que lo hace altamente sostenible, al poder obtenerse mediante la extracción a través de fuentes renovables. Por otra parte, el sistema presenta una gran proyección para ser uno de los agentes principales que contribuyan en disminuir la congestión de tráfico en carretera y aeropuertos, al ofrecer una opción colectiva y rápida. Por último, una gran ventaja para las empresas de desarrollo sería los bajos costes de mantenimiento. Esto es así, ya que el uso de la levitación magnética haría que el desgaste de las vías sea prácticamente inexistente si se compara con los medios ferroviarios convencionales

1.3 DESARROLLO DEL HYPERLOOP

Desde que Elon Musk mostró al mundo lo que era su concepción inicial de Hyperloop, se ha mostrado un gran interés en explotar la investigación sobre esta innovadora tecnología. Por ello, ahora se analizará cuáles han sido los principales sujetos que han intervenido en el desarrollo [6].

1.3.1 PRINCIPALES EMPRESAS Y PROYECTOS

Una de las empresas más importantes que han participado se trata de **“Virgin Hyperloop One”**, la cual ha desempeñado una gran función con la intención de convertir el concepto en una solución comercial [7]. Esto se ha realizado a través de varios logros, como la construcción de la pista de pruebas **“DevLoop”** en el desierto de Nevada, lo que permitió en 2020 llevar a cabo una prueba real de pasajeros, transportando a 2 personas a una velocidad de 172 km/h.



Ilustración 1-4: Centro de pruebas de Virgin Hyperloop

Por otra parte, **“Hyperloop Transportation Technologies (HTT)”** es otra empresa líder en este campo, encargada de, sobre todo, difundir la implementación de este transporte alrededor del globo terráqueo. Esto se ha conseguido a través de una metodología de trabajo basada en situar a sus trabajadores en diferentes continentes, lo que le ha permitido firmar acuerdos para explorar la viabilidad de implementar rutas de Hyperloop en varias zonas de Europa y Asia [8].

Por último, y ya a nivel nacional, se encuentra la empresa española **“Zeleros”**, que ha sido un elemento clave en el entorno europeo gracias a la creación de prototipos a escala y el ensayo a través de actividades en pistas de pruebas [9]. Un dato interesante que recalcar es que fue fundada por un grupo de ingenieros de la Universidad Politècnica De València, con la intención de implementar soluciones seguras, eficientes y viables económicamente.



Ilustración 1-5: Cápsula a escala diseñada por Hyperloop

1.3.2 AVANCES TECNOLÓGICOS E HITOS

La continuidad en el estudio del Hyperloop ha sido impulsada gracias a los diferentes hitos y avances que han demostrado su viabilidad, motivando el crecimiento tecnológico y allanando el camino para una futura implementación exitosa [10].

Uno de los principales propósitos ha sido en todo momento evidenciar la capacidad de poder alcanzar las altas velocidades en las que se basa el funcionamiento. Para ello, en 2017 la compañía “Virgin Hyperloop” logró alcanzar una velocidad de 387 km/h, lo que es el equivalente a un número de mach atmosférico de 0.3 y que le colocó a la par en cuanto a rapidez con vehículos aéreos de propulsión avanzada.

El diseño de las cápsulas ha sido otro de los focos más importantes de desarrollo, suponiendo un punto de partida importante el vehículo desarrollado por “HTT”, el cual es capaz de transportar a 40 pasajeros contando con todas las tecnologías necesarias para su, supuesto, correcto desempeño. Por su parte, la empresa Zeleros ha sido el personaje encargado de ofrecer propuestas más innovadoras, alejándose de opciones que pueden incluso considerarse ya conservadoras.

Como se ha comentado en la parte introductoria a este segmento, la financiación e inversión sobre la investigación del Hyperloop supone un factor clave, por lo que el firmado de acuerdos y tratados con entidades financieras y gubernamentales es de gran importancia. Por ejemplo, Virgin Hyperloop One se ha encargado de promover el funcionamiento en diferentes zonas de Oriente, como la posibilidad de construir una ruta que una Mumbai y Pune, mientras que HTT ha llegado a acuerdos con diversas naciones europeas con la intención de explorar rutas de gran interés. En cuanto al territorio peninsular, Zeleros se ha encargado de establecer colaboraciones con distintas entidades privadas para llevar a cabo un punto de conexión entre España y Europa a través del Hyperloop.

1.3.3 NORMATIVAS E INTEGRACIÓN DE INFRAESTRUCTURA

La importancia del desarrollo sobre este sistema de transporte no solo reside en los avances tecnológicos, sino que también la implementación de una forma de desplazarse de carácter tan innovador presenta grandes desafíos regulatorios.

Los gobiernos, asociaciones y organizaciones reguladoras de tránsito deberán trabajar de forma simultánea con las principales empresas promotoras con la intención de establecer un marco legal que permita establecer los estándares de seguridad adecuados. Las leyes por establecer deberían incluir normativa referente a la construcción y mantenimiento de toda la infraestructura necesaria, así como altos parámetros de seguridad para los pasajeros. Esto último constituye un factor primordial, el cual debe hacerse efectivo mediante sistemas de seguridad redundantes, que estén apoyados por procedimientos de monitoreo continuo para poder proceder con un estado de alarma y evacuación eficiente en cualquier momento del trayecto.

Otro desafío importante y el cual debería empezar a considerarse de forma más escrupulosa y rigurosa es la implementación del Hyperloop con la infraestructura de transporte y civil existente. El éxito de esta tecnología vendrá a través de una conexión eficiente con redes de transporte urbano que pueda asegurar una transición fluida y efectiva, procurando minimizar al máximo las interrupciones.

1.4 PERSPECTIVAS FUTURAS

Una vez se ha realizado toda la explicación introductoria pertinente a cerca del Hyperloop, incluyendo los hitos alcanzados actualmente, es el momento correcto para tratar las perspectivas de futuro que acontecen a este sistema de transporte [11].

En primer lugar, existe la necesidad de avanzar en el desarrollo de sistemas de levitación cada vez más eficientes y económicos y que, además, permitan incorporar los motores lineales de inducción que permitan alcanzar las velocidades ultrarrápidas que tanto reto suponen. Con respecto a esto, uno de los importantes avances conseguidos pero que aún tiene un gran rango por explotar, es el sistema de levitación pasiva desarrollado por HTT, lo que permite establecer imanes permanentes que reducen los costos de consumo y mantenimiento. Las pruebas referentes a esta tecnología se están realizando en Toulouse, Francia.

Por otra parte, el Hyperloop, al tratarse de un transporte de origen tan innovador y de complejo funcionamiento, requiere del uso de técnicas de construcción y materiales que puedan soportar toda la carga a la que podría estar sometido. Los materiales compuestos suponen esenciales debido a la gran resistencia y ligereza que aportan, pero que necesitan de una gran evolución para poder adaptarse de la mejor manera posible a las condiciones operativas. Además, se tiene la esperanza que la construcción basada en elementos modulares y prefabricados reduzcan los tiempos de modelación, pero manteniendo unos altos niveles de seguridad en el montaje.

En cuanto a las fuentes de energía encargadas de alimentar este sistema de transporte, hay una gran predisposición por basarse al 100% en energías renovables, que permitan establecer el Hyperloop con una perspectiva atractiva en cuanto a factores de sostenibilidad. La opción de carácter más viable que se ha propuesto hasta ahora consiste en cubrir los tubos con paneles solares que permitan obtener la energía solar necesaria para su operación. No obstante, esto sigue suponiendo un gran reto debido a la gran enmienda de como integrar estos paneles para que se adapten a la forma circular del tubo y que, a su vez, puedan convertir la potencia solar en electricidad en un rango de tiempo mucho menor al actual, para así poder asegurar una alimentación continua de todos los mecanismos pertinentes.

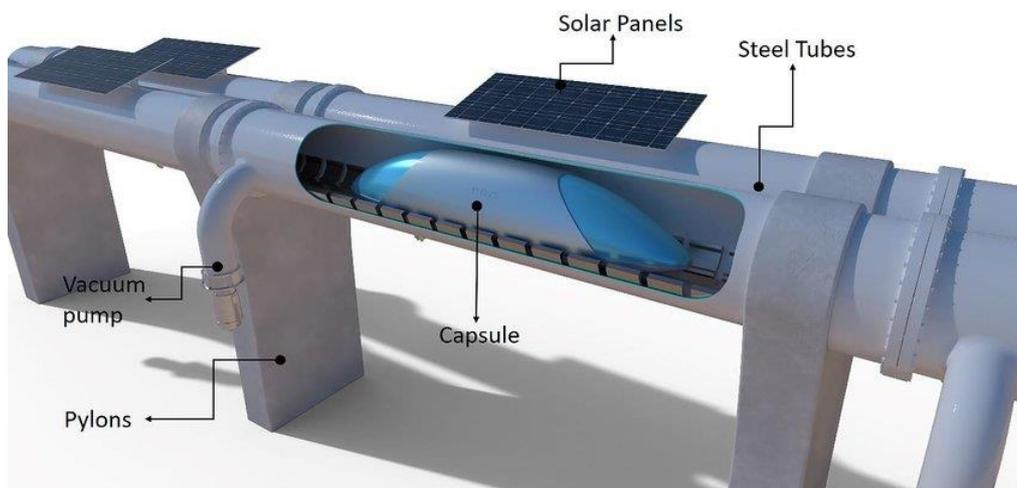


Ilustración 1-6: Integración de paneles solares en conductos Hyperloop

Una vez todas estas visiones de futuro puedan ser implementadas, comenzará la expansión global, conectando de forma preliminar, regiones con alta densidad de población y tráfico [1]. No obstante, para poder llevar a cabo esto previamente habría que reforzar las

colaboraciones y acuerdos internacionales. Por este motivo, empresas como “Virgin Hyperloop One” están comenzando el desarrollo de un marco regulatorio de la mano de la “Federal Railroad Administration” que pueda servir de ejemplo para su implementación en el resto del mundo en cuanto a leyes regulatorias y de seguridad.

En cuanto a la intervención de rutas, organizaciones como la “Hyperloop Transportation Technologies (HTT)” han firmado tratados con países pertenecientes a la Unión Europea como Eslovaquia y República Checa, lo que puede suponer un gran paso de entrada para la puesta en marcha sobre el resto de los países de la EU.

Por último, el financiamiento por parte de entidades privadas y públicas es de elevada relevancia, sobre todo de estas últimas, como puede ser la Comisión Europea, la cual ha decidido financiar gran parte de la construcción de una pista de pruebas de la mano de “Zeleros”. Esto puede suponer un gran avance en la funcionalidad de esta tecnología gracias, en gran manera, a la gran historia de innovación en términos del transporte terrestre ferroviario que mantiene España.

En conclusión, el Hyperloop representa la convergencia en su máximo esplendor de tecnologías avanzadas junto con conceptos innovadores para poder revolucionar el transporte terrestre de una manera sin precedentes. Las numerosas ventajas que esto supondría recogen, la reducción en los tiempos de viaje, la mejora en eficiencia energética que ayudaría a la efectividad económica y la sostenibilidad ambiental, además de suponer beneficios indirectos como la creación de empleo o la mejora en calidad de vida. A medida que todos los desafíos económicos, tecnológicos, técnicos y regulatorios presentes se vayan resolviendo, este sistema se encuentra cada vez más cerca de convertirse en una realidad convencional que remodele la interconexión civil, lo que la coloca como una de las innovaciones más prometedoras del presente siglo.

1.1 MOTIVACIÓN

El desarrollo emergente de los sistemas Hyperloop ha generado una gran expectativa sobre esta tecnología como bien se ha comentado ya de forma extensa, por esta razón, y como primera premisa, es importante realizar estudios y análisis para comprender el comportamiento y las características de este diseño innovador. No obstante, dado que las condiciones en las que se supone que debe operar (cápsulas presurizadas que viajan a través de tubos de vacío parcial) son muy difíciles de imitar solo con fines de estudio, es necesario llevar a cabo la investigación utilizando software de análisis basado en la mecánica de fluidos computacional como STAR-CCM+. A través del uso de este sistema, es posible establecer una amplia gama de condiciones y variaciones geométricas y de contorno/dominio para así compararlas, con el objetivo de determinar una tendencia de comportamiento en torno a cambios en ciertos parámetros. Este análisis requiere un énfasis particular en el **ratio de bloqueo (BR)**, el cual mide la relación entre la sección transversal del vehículo y la del túnel, evaluación que es esencial para poder entender como la variación de este parámetro afecta a las características aerodinámicas del sistema, permitiendo representar condiciones abiertas y cerradas al modificar el diámetro del conducto.

Dado que establecer las condiciones de vacío en la vida real todavía es una tarea que se encuentra en la fase de desarrollo, hasta la fecha, solo se puede analizar cómo se comporta el diseño del Hyperloop en condiciones abiertas, por ejemplo, utilizando un túnel de viento. Por esta razón exacta, uno de los análisis cruciales en la investigación del sistema Hyperloop es examinar cómo se comparan los resultados de estudios realizados en condiciones abiertas con aquellos en condiciones cerradas. Esta comparación es de suma importancia ya que proporciona una comprensión profunda de qué hallazgos de ambos estudios se alinean entre sí,

lo que ayuda a los investigadores a realizar estudios en túneles de viento (que simulan características abiertas) y saber exactamente qué información extraída puede aplicarse a los sistemas Hyperloop bajo condiciones de vacío (simulados en condiciones cerradas).

Por las razones explicadas anteriormente, es de relevancia crítica llevar a cabo un estudio preciso y exacto utilizando herramientas de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), ya que proporcionará información sobre parámetros clave y el comportamiento de los sistemas Hyperloop. Consecuentemente, la introducción de la **velocidad inducida** podría complicar el análisis. Este concepto hace referencia a la velocidad adicional que se genera debido al movimiento del vehículo dentro del túnel, lo que provoca la creación ondas de presión y velocidad que no se disipan o propagan de una manera uniforme. Este fenómeno no se puede cuantificar fácilmente en sistemas reales como túneles de viento, lo que hace esencial su estudio en simulaciones de CFD, ya que estas ondas afectan a la velocidad percibida por la cápsula y otros aspectos aerodinámicos esenciales. Investigar el impacto de esta velocidad inducida en el rendimiento del sistema es esencial para modelar y optimizar de manera precisa el diseño del Hyperloop, ya que influye de manera significativa en factores como el consumo de energía y el tiempo de viaje.

En resumen, el desarrollo emergente de los sistemas Hyperloop ha generado grandes expectativas debido a su gran potencial para revolucionar el transporte. Sin embargo, la complejidad de operar en condiciones de vacío requiere la realización de estudios que se basan en la utilización de herramientas basadas en la mecánica de fluidos computacional como STAR CCM+. Estos estudios proporcionan información de gran valor acerca del funcionamiento y comportamiento ante cambios de geometría o dominio, por lo que es esencial proceder con un análisis profundo a la par que preciso, tal y como se realizará a lo largo de este trabajo.

1.1 LITERATURA ANTERIOR

Una vez revisada cual es la motivación existente tras la realización de este trabajo, habría que hacer un repaso de antecedentes literarios. Esto se debe a que el estudio del sistema Hyperloop y su complejidad operativa ha atraído desde su mismo inicio el interés de numerosas investigaciones, desde que Elon Musk publicó su trabajo seminal “Hyperloop Alpha” [12]. En este se delinea el concepto original de lo que es el Hyperloop, destacando la capacidad que tendría para revolucionar el transporte a través de la eliminación de la fricción del aire y la resistencia, lo cual solo se podría conseguir mediante un pertinente y adecuado desarrollo tecnológico que abordase todas las cuestiones pertinentes, tales como las aerodinámicas, energéticas, funcionales y de seguridad.

En el contexto del Hyperloop, hay un aspecto crucial que ha tenido que requiere un gran foco de atención: la geometría del túnel. El estudio de Jae-Sung Oh et al. (2019) titulado “Numerical Investigation of Aerodynamic Drag and Pressure Waves in Hyperloop Systems” [13] demuestra como los túneles de mayor diámetro reducen de forma significativa la resistencia aerodinámica que puede llegar a sufrir el vehículo en movimiento, lo cual viene dado por la reducción en el efecto de bloqueo aerodinámico. En este, además, se trató como las variaciones en condiciones operativas fundamentales como puede ser la velocidad o la presión atmosférica afectan la eficiencia de este sistema de transporte. Mediante análisis detallados, se concluyó en que incrementos del 10% en la velocidad de la cápsula supondrían un aumento del 20% en el consumo de energía y la resistencia experimentada. En cambio, se reveló que el establecimiento de niveles de presión óptimos en la entrada del túnel reduce el drag experimentado en un 30%.

En relación con el previo artículo, habría que analizar de forma análoga las conclusiones obtenidas en el estudio de Jae-Sung Oh titulado “Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics of Hyperloop System” [14]. Las simulaciones realizadas en este trabajo escenificaron como un aumento en la sección transversal del conducto de un 50% podría reducir el Drag experimentado en un 30%, lo que mejor la eficiencia del sistema. Otra de las relevantes resoluciones a las que se llegó es que aumentar la velocidad de la cápsula de, por ejemplo, 100 a 350 m/s, muestra un incremento proporcional en el coeficiente de resistencia, lo cual es un impacto de gran escala teniendo en cuenta la premisa principal del Hyperloop, como es conseguir velocidades supersónicas a un costo de arrastre relativamente bajo.

Por último, es de interés recalcar las conclusiones obtenidas en el estudio de Lluésma-Rodríguez et al. (2021), titulado “CFD Simulation of a Hyperloop Capsule in a Low-Pressure Environment Using an Aerodynamic Compressor as Propulsion and Drag Reduction Method” [15]. La notabilidad de esta investigación viene dada por el enfoque riguroso que realizó en el entendimiento sobre la integración de compresores en los diseños de cápsulas Hyperloop, basándose en simulaciones por CFD. Este estudio pudo demostrar como la incorporación de compresores aportaban una reducción de hasta el 30% en la resistencia aerodinámica, mejorando de forma significativa la eficiencia del sistema. Con esta configuración, la velocidad de la cápsula se podría aumentar en un 20% sin incrementar en gran medida el drag experimentado, lo que resulta en un aspecto esencial para el desarrollo de esta tecnología. Además, se escenificó a través de simulaciones, como el refinamiento en las geometrías características de la cápsula podrían reducir la turbulencia y vorticidad en la parte trasera del vehículo hasta en un 40%, aportando estabilidad y comodidad al viaje.

1.2 OBJETIVOS

Teniendo en cuenta la motivación y las ventajas descritas, las simulaciones en CFD que se llevarán a cabo a lo largo de este trabajo tienen la finalidad de cumplir con una serie de propósitos que puedan contribuir al sector con una comprensión más profunda de cómo el comportamiento del Hyperloop se ve influenciado al comparar aspectos fundamentales relacionados con condiciones abiertas y cerradas, los efectos de la velocidad inducida y la variación de la velocidad de entrada. La descripción de estos objetivos se presenta a continuación:

- 1) Estudio Comparativo de Condiciones Abiertas y Cerradas:** El objetivo es realizar un análisis comparativo, abordando el rendimiento de los sistemas Hyperloop en condiciones abiertas y cerradas utilizando simulaciones CFD en STAR-CCM+. Esto se logrará reduciendo sistemáticamente el valor del Ratio de Bloqueo (BR) hasta un valor tendiente a cero, siempre manteniendo el tamaño del vehículo. Con esto, se busca cuantificar el grado de similitud o disparidad entre los resultados obtenidos en las diferentes condiciones.
- 2) Aplicabilidad Práctica de Estudios Simulados:** Al llevar a cabo la tarea del punto anterior, se podrán estudiar las áreas de convergencia y divergencia entre las condiciones cerradas y abiertas. Esto es de crucial importancia porque, como ya se ha mencionado en la sección de motivación, proporciona una comprensión de la alineación de los resultados bajo ambas circunstancias operativas. Así, se ayuda a los investigadores a realizar estudios en túneles de viento, que simulan condiciones abiertas, y determinar con precisión qué información extraída puede aplicarse a los sistemas Hyperloop operando bajo condiciones de vacío (representado bajo

características cerradas). Por este motivo se pretende realizar simulaciones en ambas circunstancias a través de CFD.

- 3) Variación de la Velocidad de Entrada:** Un objetivo esencial es investigar cómo la imposición de diferentes velocidades de entrada del Hyperloop afectan sus características aerodinámicas. Este análisis se centrará en observar los cambios en parámetros clave como la presión o la distribución de fuerzas a medida que se ajusta la velocidad del vehículo. Además, se evaluará el impacto de la variación de la velocidad en relación con los diferentes Ratios de Bloqueo establecidos, identificando como varía el comportamiento aerodinámico del sistema, para así realizar un marco de funcionamiento para diversos escenarios de velocidad.
- 4) Introducción del Concepto de Velocidad Inducida:** Dado que el número de estudios que introducen los efectos de la velocidad inducida es reducido, el objetivo es explicar de manera comprensiva el razonamiento detrás de este fenómeno y analizar su impacto en métricas de rendimiento como la presión, las fuerzas, el consumo de energía y la eficiencia aerodinámica, siempre manteniendo a la vista parámetros absolutos y normalizados. Con este análisis, el objetivo es medir hasta qué punto la velocidad inducida influye en parámetros cruciales y cómo estos efectos varían según la velocidad de la cápsula y el diámetro del túnel.

2. METODOLOGÍA

En la sección que procede a continuación, se tratará de explicar de forma precisa el procedimiento seguido para establecer el modelado completo de los sistemas de estudio. La configuración de estos casos se ha realizado mediante el software STAR CCM+, el cual permite realizar simulaciones basadas en la mecánica de fluidos computacional. Por este motivo, a la hora de abordar las configuraciones elegidas para cada subapartado, se seguirá el orden establecido por el software de trabajo.

Se procede, en primer lugar, definiendo la geometría del vehículo y del conducto con el objetivo de garantizar que las simulaciones reflejen con precisión las condiciones operativas del Hyperloop.

A continuación, para proceder con el estudio de la manera más precisa posible, se debe comenzar con el mallado de la estructura geométrica. Un objeto de gran importancia es generar una malla de alta calidad, con una densidad adecuada y resolución en áreas críticas y de interés. De esta forma se pretende garantizar que los resultados de las simulaciones sean fiables, manteniendo un coste computacional asumible y razonable.

Una vez se ha establecido la geometría y el mallado, con el propósito de estudiar el comportamiento, habría que establecer los modelos físicos sobre los cuales se regirá la simulación, para así captar todos los fenómenos relevantes.

Por último, se debe establecer las condiciones de contorno a través de las diferentes subregiones, con la intención de replicar las condiciones operativas del sistema Hyperloop.

2.1 MODELO GEOMÉTRICO

Una vez se ha hecho constar la línea de trabajo a seguir, la primera configuración que se debe realizar es el modelo geométrico. Como se ha dicho anteriormente, este constituye un aspecto crucial en el análisis aerodinámico ya que determina con que precisión y, por lo tanto, validez, se darán las simulaciones a realizar. Para poder replicar estas condiciones de la manera más exacta posible, hay que establecer el sistema de estudio como un túnel de baja presión donde el sistema Hyperloop se desplaza gracias a la levitación magnética, es decir, sin mantener contacto directo con una superficie. En este caso, la cápsula se diseñará como un cuerpo rectangular con bordes redondeados, siendo el dominio del sistema completo, simétrico axialmente. De este modo, el modelo utilizado se describirá a continuación.

2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL DOMINIO

En el análisis de la dinámica computacional, concretamente para sistemas como el Hyperloop, la definición adecuada del dominio del sistema de estudio es crucial.

El dominio del sistema se refiere, a grandes rasgos, al espacio físico en el que se realizarán las simulaciones. Esto abarca tanto la región que se encuentra alrededor de la cápsula como las áreas circundantes necesarias para capturar los efectos del flujo de manera realista, más en concreto, aquellas que se encuentran aguas abajo. Esto es así ya que en estas regiones se puede estudiar como el flujo ha cambiado su comportamiento tras haber interactuado con la cápsula.

Manteniendo constancia de las zonas de interés, un importante aspecto a tener en cuenta es la implementación de un dominio reducido a la hora de realizar las simulaciones. La justificación tras esto es que este enfoque presenta varias ventajas, incluyendo una mayor eficiencia computacional, tiempos de simulación más cortos y la capacidad de focalizar la

resolución en las áreas de mayor interés ya que los sistemas Hyperloop presentan túneles de varias unidades kilométricas de longitud, por lo que es importante simular únicamente aquellas secciones que se ven afectadas por el paso de la cápsula. Una vez realizada esta presentación teórica del dominio, se puede presentar la configuración establecida.

Las dimensiones de la cápsula de se han definido como:

$$L_{cápsula} = 5.75 \text{ m} ; D_{cápsula} = 1.55 \text{ m}$$

Mientras, para el dominio, se ha optado por una longitud aguas abajo de 5 veces la longitud de la cápsula, de esta forma los efectos de estela se pueden estudiar en su totalidad. Las dimensiones para el túnel son, por lo tanto:

$$L_{túnel} = 50.75 \text{ m} ; L_{aguas_abajo} \approx 30 \text{ m} ; L_{aguas_arriba} = 15 \text{ m}$$

El sistema de estudio se queda como:

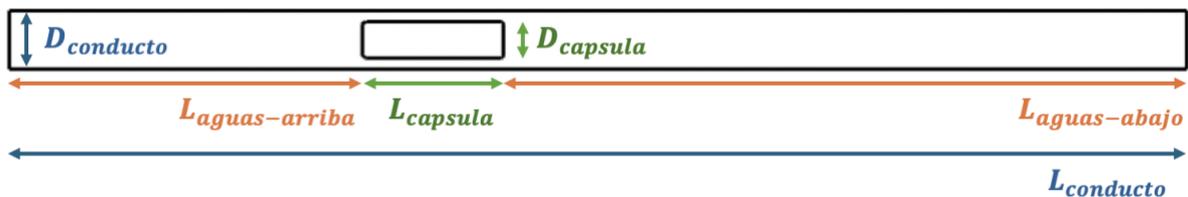


Ilustración 2-1: Dimensiones Sistema de Estudio

2.1.2 TIPOS DE GEOMETRÍA

En esta sección se tratará el desarrollo de los diferentes tipos de geometría utilizados, para así realizar posteriormente el análisis comparativo de condiciones abiertas y cerradas en sistema Hyperloop. Para lograr esto, se ha optado por reducir sistemáticamente el valor del ratio de bloqueo (BR) hasta un valor, aproximadamente, tendiente a cero, manteniendo siempre el tamaño del vehículo ya establecido. Este enfoque es fundamental para cuantificar el grado de similitud o disparidad entre las diferentes configuraciones adoptadas.

El parámetro a modificar ha sido el ratio de bloqueo, el cual representa la relación entre la sección transversal del vehículo y la sección transversal del túnel:

$$BR = \frac{A_{cápsula}}{A_{conducto}} \propto \left(\frac{D_{cápsula}}{D_{conducto}} \right)^2 \quad [1]$$

Ecuación 2-1: Blockage Ratio

En las siguientes tablas se presentan los diferentes valores adoptados para este parámetro junto con una representación de perfil del sistema, siendo BR1 el caso base, mientras que para los otros dos casos de estudio se divide el ratio de bloqueo inicial entre 2 y 4 correspondientemente. De esta forma, se consigue un aumento sistemático de la sección del túnel:

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
$R_{capsula} [m]$	0.775	0.775	0.775
$R_{conducto} [m]$	1.25	1.767	2.5
BR	0.3844	0.192	0.0961

Tabla 2-1: Condiciones Geométricas de Casos de Estudio

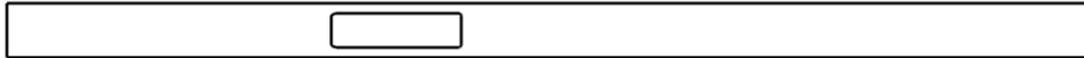


Ilustración 2-2: Geometría Ratio Bloqueo 1

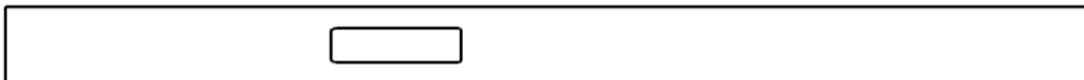


Ilustración 2-3: Geometría Ratio Bloqueo 2

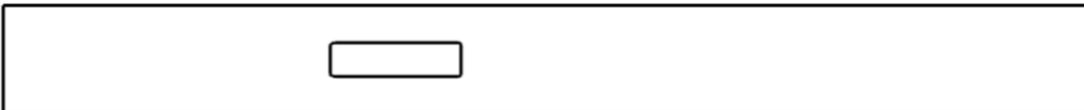


Ilustración 2-4: Geometría Ratio Bloqueo 3

2.2 ESTRATEGIA DE MALLADO

Como ya se ha introducido previamente, la estrategia de mallado es un aspecto crucial a la hora de elaborar una simulación mediante CFD. Mediante este proceso, se establece con que exactitud y precisión las diferentes secciones del sistema son evaluadas por el software de uso. El objetivo final es diseñar una malla capaz de capturar con precisión todos los fenómenos o sucesos que puedan ocurrir alrededor del cuerpo de estudio, buscando una alta resolución de las características del flujo. No obstante, la estrategia se tiene que realizar manteniendo en cuenta la capacidad computacional de la que se dispone, por lo que la premisa de trabajo debería ser aumentar la densidad de malla en aquellas zonas de mayor importancia, mientras se reduce la cantidad de celdas en aquellas donde los fenómenos recurrentes carecen de impacto sobre el sistema. De esta forma se consigue un equilibrio en la formación de la malla, manteniendo un coste computacional sostenible y razonable. Esta sección trata de detallar el proceso de mallado adoptado, justificando la elección de cada parámetro para mantener los objetivos establecidos en esta breve introducción.

Con la finalidad de conseguir una eficiencia analítica a la hora de establecer la malla, se ha optado por los controles en dos estrategias distintas; por una parte, el sistema general y por otra la zona circundante al vehículo y las próximas a las paredes. Mediante esta división del mallado, se consigue establecer la precisión y resolución necesaria para cada región, siendo la del sistema general menor, por lo que se puede reducir el costo computacional al no tener que capturar efectos del flujo de suma importancia. Por su parte, las zonas que se hallan alrededor del vehículo y a lo largo de la estela del flujo necesitan una demanda de malla mayor, ya que los fenómenos críticos e importantes para el objeto de este estudio se darán en estas inmediaciones. Al diferenciar estas estrategias se consigue optimizar los recursos necesarios tal y como se presenta a continuación:

2.2.1 MALLADO CASO BASE (BR1)

En esta sección se describirá el proceso de mallado del caso base. La configuración para el resto de los casos se describirá posteriormente.

2.2.1.1 Mallado Base

Manteniendo en todo momento el objetivo de la capa de malla general, la configuración que se ha adoptado para esta puede describirse a continuación como:

Formato de Mallado

En primer lugar, para el formato de mallado se ha optado por un “**Quadrilateral Mesher**”, el cual dimensiona en 2D celdas con formas cuadrilaterales. Se ha optado por esta opción ya que [16] captura de una forma más exacta las direcciones de curvatura principal, por lo que se puede alinear mejor a la geometría del caso y a la curvatura que presenta en los extremos la cápsula del sistema. Además, para acentuar la capacidad de la malla de adaptarse a esta tipología geométrica se ha activado en el software de uso la opción de refinamiento por curvatura [17]. El refinamiento por proximidad también será usado de forma que en aquellas zonas donde existe proximidad entre 2 superficies, la malla tenga mayor densidad y así recopilar información sobre posibles comportamientos anómalos. Esta configuración, junto con la elección de creación de mallas alineadas y una calidad mínima del 0.05 aseguran una transición adecuada entre las celdas minimizando errores numéricos.

A su vez, se ha especificado el uso de “**Prism Layer Mesher**”, lo que permite realizar una refinación de malla en aquellas superficies críticas donde la información extraíble es de mayor relevancia. Esto es de especial incumbencia en regiones próximas a la capsula y a las paredes del túnel, así como para resolver la capa límite.

De esta forma, esta estrategia permite obtener una malla estructurada de forma ordenada gracias al “Quadrilateral Mesh” mientras se añade resolución a través del “Prism Layer Mesh” en zonas donde la interacción flujo-superficie se intensifica. A continuación, se muestra una tabla a modo resumen:

FORMATO DE MALLADO GENERAL
Quadrilateral Mesher
Prism Layer Mesher
Refinamiento por Curvatura y Proximidad
Mallas Alineadas con calidad mínima de 0.05

Tabla 2-2: Formato de Mallado General

Configuración de Controles

Una vez se ha establecido la base del mallado, se pueden definir los controles seleccionados para caracterizar el formato de las celdas.

Se debe empezar por el establecimiento del **tamaño base**, el cual se ha supuesto en 0.075 ya que se trata de una dimensión razonable que proporcionan precisión a la vez que consumo computacional razonable, siendo este el **target surface size** en todo el perímetro general.

Con el objetivo de evitar una densidad de malla excesivamente alta, se ha establecido el **mínimum surface size** en 0.012 m, lo que supone un 16% del tamaño base. Este control se

encarga de eliminar todas las celdas que por su ubicación y distribución tengan un tamaño menor al mínimo establecido.

En cuanto al **surface curvature**, este permite aumentar el número de celdas basándose en la curvatura de la superficie a trabajar. Para este estudio, se ha optado por 36 puntos por círculo, de manera que las áreas curven se aproximen de una forma lo suficientemente correcta.

Como bien se ha comentado anteriormente, el **surface proximity** se ha establecido proponiendo un *point in gap* de 2, lo que hace referencia al número de punto que se usarán para detectar la proximidad entre superficies cercanas.

El **surface growth rate** hace referencia al incremento de los elementos de la malla a medida que la superficie se aleja de las regiones donde se tiene un mayor refinamiento. En este caso, se ha establecido en 1.06, de esta forma se asegura una transición suave, sin cambios bruscos, entre los diferentes elementos de la malla. Un ratio de 1 sería mantener el mismo tamaño.

Por último, sería conveniente determinar los controles que regirán el funcionamiento de la capa prismática. Para esta configuración, se ha tratado de establecer la combinación más satisfactoria entre los 3 siguientes parámetros:

- **Número de capas prismáticas:** Se ha definido un total de 15 capas, para poder asegurar una mejor resolución en la capa límite y zonas de interés analítico.
- **Extensión de la capa límite:** Este factor se encarga de controlar el incremento en tamaño de las capas prismáticas. De esta manera, definiéndolo como 1.5, se establece que una celda adyacente a otra cambiará su tamaño un 50% como máximo, apelando así por una distribución gradual.
- **Tamaño Absoluto:** Este parámetro define el tamaño del conjunto de la capa prismática. Se considera que con 0.1 m se puede llegar a capturar de forma razonable y precisa los fenómenos que suceden en las inmediaciones de las superficies.

En la siguiente tabla se deja constancia de los controles tomados para el desarrollo de la malla:

CONTROLES MALLADO	VALORES / ESPECIFICACIÓN
Base Size	0.075 [m]
Target Surface Size	0.075 [m]
Minimum Surface Size	0.012 [m]
Surface Curvature	36 puntos por círculo
Surface Proximity	2 puntos entre superficies
Surface Growth Rate	1.06 [-]
Prism Layer Controls	Number of Prism Layers: 15 Prism Layer Stretching: 1.5 Absolute Size: 0.1 [m]

Tabla 2-3: Controles Mallado Caso Base

La malla final que se obtiene es la siguiente:



Ilustración 2-5: Representación Mallado Base en Sistema Completo (BR1)

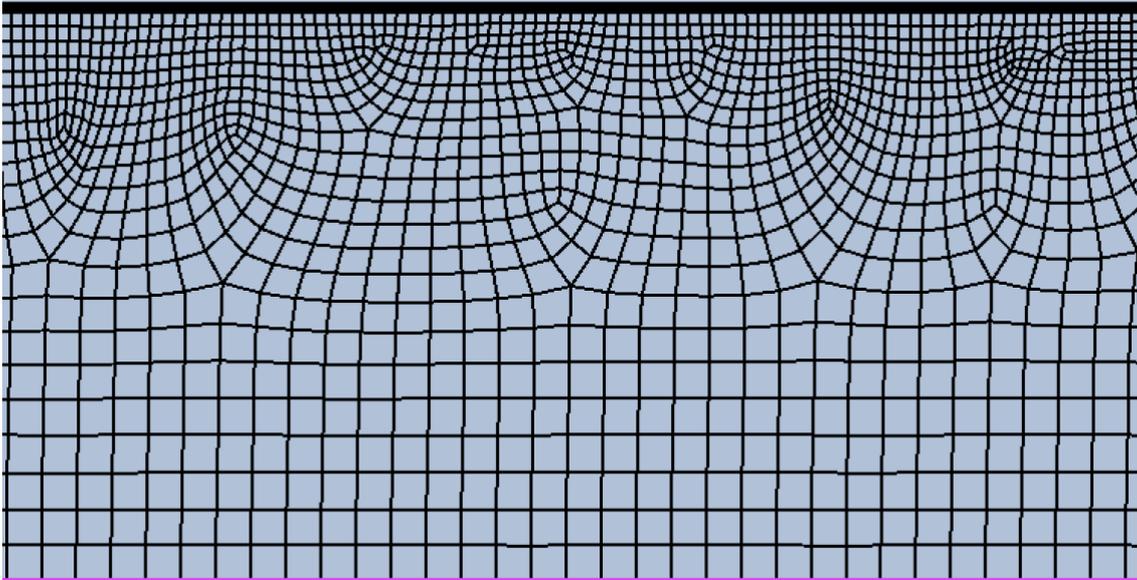


Ilustración 2-6: Mallado Base (BR1)

Previo a analizar la malla resultante, cabe destacar que esta imagen se trata de la malla obtenida en la sección aguas arriba, antes de la interacción con la cápsula. Además, se debe remarcar que la línea rosa en la parte inferior se trata del eje de simetría axial del sistema, por lo que en la fotografía únicamente se observa la mitad superior del túnel.

Como bien se puede observar, la malla se encuentra formada predominantemente por elementos cuadriláteros, donde el refinamiento progresivo hacia la pared superior se realiza para por las posibles interacciones entre el flujo y esta sección. Por otra parte, la transición entre las diferentes celdas del sistema parece ser gradual y, por lo tanto, adecuada y sin cambios abruptos. A grandes rasgos, la malla parece adecuarse de forma correcta a la geometría de la superficie, presentando elementos uniformes y bien estructurados, lo que sugiere una calidad de malla alta. Esto se ha tratado de conseguir manteniendo un coste computacional asequible y con una densidad de malla relativamente baja que permita aumentar la exigencia en aquellas zonas donde el análisis lo requiere, como se verá a continuación.

2.2.1.2 Mallado Zonas de Interés

Al tratar este estudio del análisis de la dinámica fluido-computacional de un sistema Hyperloop, a la hora de realizar la simulación tiene que tratarse de conseguir unos niveles de precisión suficientemente altos en las regiones cercanas a la cápsula y su estela. Esto es así ya que en estas zonas se pueden dar los fenómenos de formación de capa límite, la turbulencia del flujo o la separación de este. Con la intención de cumplimentar este requerimiento, se han implementado controles de mallado específicos para estas zonas, presentando un refinamiento

detallado y una adaptación precisa a la geometría de estas zonas. A continuación, se describen estos mismos controles a través de la separación en diferentes divisiones de interés:

Controles de Cápsula

En la presente sección el objetivo es mostrar los controles aplicados a la malla situada alrededor de la cápsula y a lo largo de la estela del flujo, explicando como cada configuración seleccionada contribuye a capturar de forma minuciosa los efectos aerodinámicos que suceden. No obstante, en las secciones de interés se sigue manteniendo el formato de mallado seleccionado para las secciones previas, por lo que únicamente se variará el valor de los controles establecidos.

En este caso, el **base size** se reducirá a un 10% del tamaño base, resultando en 0.0075 m. Lo que genera esto es una región de estudio para cada celda mucho menor, aumentando la densidad de malla en estas zonas, lo que desemboca en una captura de las interacciones del flujo considerablemente más precisa.

Pese a que en el resto de los valores se mantienen los correspondientes al sistema general, los controles referentes a la capa prismática presentan una variación que, pese a no ser muy notables, contribuyen en su conjunto a la mejora de resolución en la malla. Para ello, se han dispuesto 13 **capas prismáticas** con un estiramiento en esta capa de 1.4, lo que mantiene una distribución gradual en estas áreas. Con respecto al **grosor total**, se ha buscado una reducción de este, estableciéndose un 24% del tamaño base del sistema, lo que genera una capa de 0.018 m. Para este caso, el **surface growth rate** se especifica con un valor de 1.2.

En la presente imagen se ilustra la malla obtenida para los parámetros establecidos, los cuales se resumen en una tabla a continuación:

CONTROLES MALLADO	VALORES / ESPECIFICACIÓN
Base Size	0.0075 [m] (10% tamaño base)
Surface Growth Rate	1.2 [-]
Prism Layer Controls	<i>Number of Prism Layers: 13 Prism Layer Stretching: 1.4 Absolute Size: 0.018 [m]</i>

Tabla 2-4: Controles Mallado Cápsula (BR1)



Ilustración 2-7: Representación Mallado Cápsula en Sistema Completo (BR1)



Ilustración 2-8: Mallado Alrededor de Cápsula (BR1)

Como se puede identificar, la estrategia de mallado seguida ha permitido conseguir aquello que se pretendía, es decir, una alta densidad de elementos en las porciones cercanas al vehículo mediante una transición suave entre los diferentes tamaños de celdas, todo esto, con una adaptación correcta a las curvaturas presentes en el sistema.

Controles de Estela

Otra zona en la que refinar la malla se trata de la superficie posterior a la capsula del Hyperloop, ya que en esta sucede la turbulencia del flujo y a través de esta se puede obtener el salto de presiones y velocidad del sistema, lo que supone información crucial para el análisis del sistema que ocupa este trabajo. Además, la estela también afecta significativamente a las fuerzas y momentos resultantes.

Una vez realizado este apunte, se puede desarrollar la estructura por la que se ha optado para determinar las dimensiones de este mallado. La distancia hasta donde se aplica el refinamiento de la estela se ha impuesto en 12 metros, para así poder abarcar toda la zona en la cual el flujo sigue estando perturbado por la interacción con la cápsula. En cuanto al refinamiento de la malla, este puede ser menor que para la sección del vehículo, ya que no se requiere de la misma precisión de cálculo. Por este motivo, para la estela se ha optado por un tamaño de refinamiento de un 30% del tamaño base, proporcionando un **base size** para esta superficie de 0.0225 metros. En este caso, el **growth rate** se establece en 1.35.

En cuanto a la capa prismática, se ha decidido aplicar dicho control a la pared superior del túnel a lo largo de todo su recorrido posterior al vehículo. Este refinamiento de malla viene dado por la necesidad de capturar, sobre todo, los fenómenos de separación y adherencia del flujo. Esto es así ya que dependiendo de la distancia que haya entre la cápsula y la pared, además de la velocidad del flujo, este puede tender a separarse si el movimiento se produce a una velocidad muy alta y la pared se encuentra a una distancia lo suficientemente lejana, por lo que una densidad de celdas contundente en las inmediaciones de las paredes superior e inferior es de gran importancia. Además, la formación de la capa límite también obliga a mostrar con precisión el comportamiento cerca de las paredes, lo que exige prestar atención al factor “y+”. Este parámetro adimensional indica la distancia entre la superficie de la pared y la primera celda de la malla, lo que obliga a mantenerlo en valores cercanos a 1 en este estudio, ya que esto es esencial para poder resolver la capa límite haciendo uso de la precisión que aporta la capa prismática. De esta forma, se consigue capturar con exactitud los fenómenos aerodinámicos cerca de las paredes.

Con la intención de controlar este mallado, se ha impuesto una capa prismática formada por 11 capas, con un **prism layer stretching** de 1.4, lo que garantiza y mejora la estabilidad de la

simulación. Esta capa cuenta con un **absolute size** de 0.025m, tamaño razonable para poder visualizar los sucesos dados cerca de esta superficie de trabajo.

Esta configuración adoptada se puede ilustrar a través de la siguiente imagen, mostrando antes una tabla a modo resumen sobre los parámetros seleccionados:

CONTROLES MALLADO	VALORES / ESPECIFICACIÓN
Base Size	0.0225 [m] (30% tamaño base)
Surface Growth Rate	1.35 [-]
Wake Refinement Size	<i>Distance: 12 [m]</i>
Prism Layer Controls	<i>Number of Prism Layers: 11 Prism Layer Stretching: 1.4 Absolute Size: 0.025 [m]</i>

Tabla 2-5: Controles Mallado Estela (BR1)



Ilustración 2-9: Representación Mallado Estela en Sistema Completo (BR1)

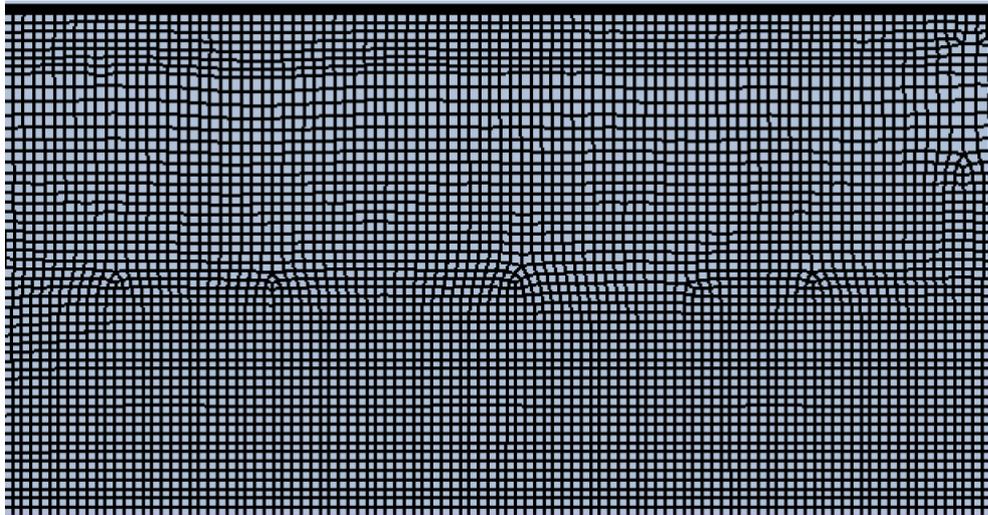


Ilustración 2-10: Mallado Estela (BR1)

En este caso, al contrario que sucedía con la sección previa a la cápsula, la densidad de malla es mucho mayor, contando con un número de celdas considerablemente superior que permitan captar los sucesos aerodinámicos pertinentes. Vuelve a caer especificar que la línea rosa en la parte inferior se trata del eje de simetría axial del sistema, por lo que en la fotografía únicamente se observa la mitad superior del túnel. De forma general, se considera que los elementos cuadriláteros presentan una densidad y transición suave que permitirán estudiar la zona correspondiente a la estela de una manera fructífera.

2.2.2 ADAPTACIONES MALLADO CASO 2

En esta sección se abordará la adaptación del mallado propuesto para el segundo caso, en el cual el Blockage Ratio es más pequeño, lo que significa una sección de túnel mayor. Para este caso, el formato de mallado, descrito en la Sección 2.2.1.1, será el mismo que para la configuración base, siguiendo todas las características establecidas en la *Tabla 2-3: Controles Mallado Caso Base*. No obstante, hay una serie de controles que se han debido de cambiar para adaptarse mejor a la geometría de este caso concreto, los cuales se presentan a continuación.

2.2.2.1 Variación Controles Mallado

A la hora de abordar esta configuración, donde el diámetro del tubo es mayor, hay que tener en cuenta que el área de actuación del flujo se incrementa, por lo que habría que refinar la malla a través de la modificación de ciertos controles.

En primer lugar, se ha optado por reducir el **base size** del sistema completo a 0.055 m. Esto es debido a la mayor área de cobertura del análisis, por lo que refinar la malla general asegura que la resolución buscada se mantenga adecuada a lo largo de toda la extensión del túnel.

Por otra parte, se ha aumentado la **dimensión de la capa prismática** a 0.5 m. La razón detrás de esta modificación se basa en 2 principales motivos:

- 1) Aumento Grosor de la Capa Límite: Al desarrollarse sobre superficies más largas debido al incremento del radio del túnel, la capa prismática tiene que ser capaz de albergar toda esta superficie para así poder capturar los gradientes de velocidad y presión, así como la transición del flujo en la cercanía de las paredes del sistema.
- 2) Mejora Resolución Vertical: Aumentar la sección del tubo conlleva una mayor variación en la dirección perpendicular del flujo, por lo que un aumento de la capa prismática permite aportar la precisión necesaria al análisis de estas componentes.

Estos ajustes realizados con respecto a la configuración inicial permiten que se mantenga la obtención de resultados precisos a través de una exigencia computacional mayor, pero siempre dentro de los límites comprensibles y adecuados al formato de este estudio.

VARIACIÓN CONTROLES MALLADO	VALORES MODIFICADOS
Base Size	0.055 [m]
Prism Layer Controls	<i>Number of Prism Layers: 15 Prism Layer Stretching: 1.5 Absolute Size: 0.5 [m]</i>

Tabla 2-6: Variaciones Controles Caso 2

2.2.2.2 Escenas de Mallado

Sección Túnel Aguas Arriba

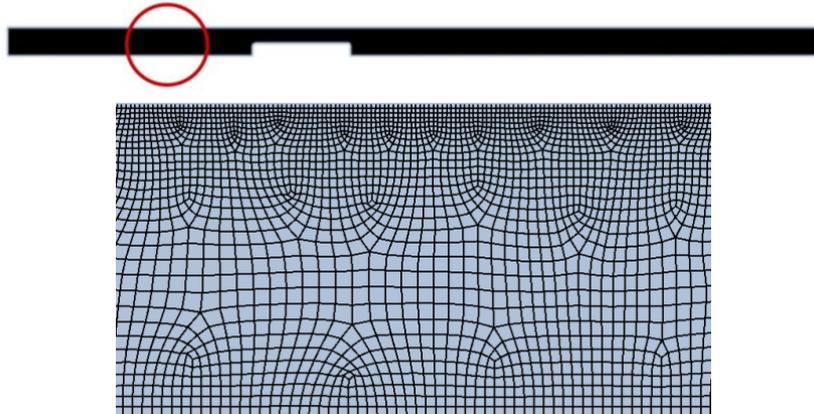


Ilustración 2-11: Representación Mallado Base (BR2)

Esta imagen muestra la malla formada para el segundo caso de estudio en la sección del túnel previa a la cápsula, es decir, aguas arriba. Como era de esperar, la densidad de esta malla es notablemente mayor que la asociada al caso base, mostrando asimismo una buena transición en el tamaño de los elementos. Esto se ha conseguido al reducir el tamaño base mientras se aumentaba la dimensión de la capa prismática. De todos modos, las secciones de gran importancia analítica se presentan a continuación.

Sección Cápsula

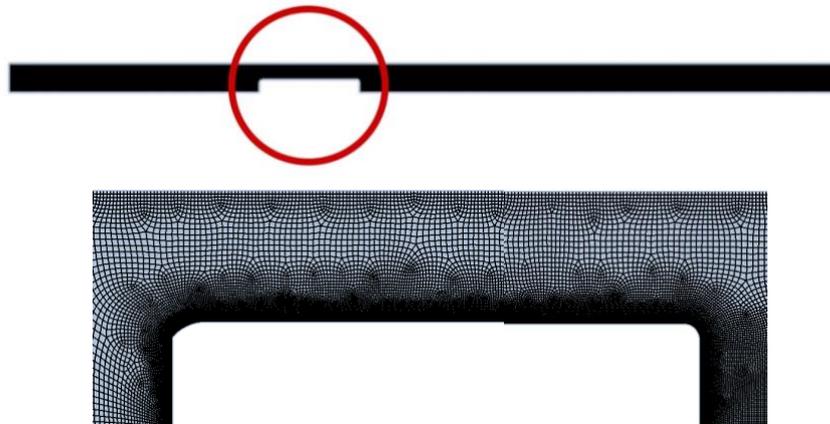


Ilustración 2-12: Representación Mallado Cápsula (BR2)

Sección Túnel Aguas Abajo

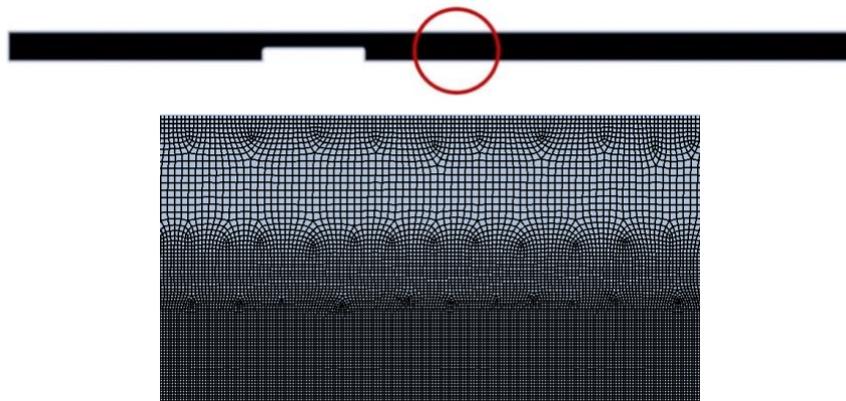


Ilustración 2-13: Representación Mallado Estela (BR2)

Las mallas correspondientes a la sección de la cápsula y la estela presentan asimismo una configuración adecuada, al igual que en el caso principal. No obstante, se puede observar cómo en estos casos, el refinamiento del vehículo y su estela no llegan a enlazarse con la capa prismática de la pared superior, debido al aumento en el diámetro del sistema. Esto no supone una problemática ya que, de todos modos, las zonas críticas y de información relevante presentan incluso un mayor refinamiento que en el primer caso de estudio. Esto se puede identificar al analizar la zona circundante a la cápsula y la posterior a la misma, donde las zonas de mallado con mayor densidad son de dimensiones más grandes y de menor tamaño de celda, permitiendo asegurar una distribución uniforme de los elementos refinados para poder capturar los fenómenos inducidos por el sistema.

2.2.3 ADAPTACIONES MALLADO CASO 3

Esta última configuración de mallado hace referencia al caso de Blockage Ratio más pequeño, lo que significa un diámetro de tubo de mayo medida. Con la intención de adaptar el mallado a esta nueva dimensión, se han realizado ajustes específicos, manteniendo todos los controles iguales al caso anterior (BR2), excepto por el tamaño de celda y el número de capas prismáticas alrededor del vehículo. La motivación tras esta elección viene dada ya que las interacciones del flujo con la superficie de la cápsula se pueden volver más complejas, especialmente en términos de separación de flujo.

2.2.3.1 Variación Controles de Cápsula

Por las razones ahora expuestas, el **number of prism layers** alrededor del vehículo se ha aumentado a 17, mientras que **prism layer total thickness** se ha establecido en 0.025 m. A continuación, se presentan las variaciones en una tabla:

VARIACIÓN CONTROLES MALLADO	VALORES MODIFICADOS
Prism Layer Controls	<i>Number of Prism Layers: 17</i> <i>Prism Layer Stretching: 1.4</i> <i>Absolute Size: 0.025 [m]</i>

Tabla 2-7: Variaciones Controles Caso 3

2.2.3.2 Escenas Mallado

Sección Túnel Aguas Arriba

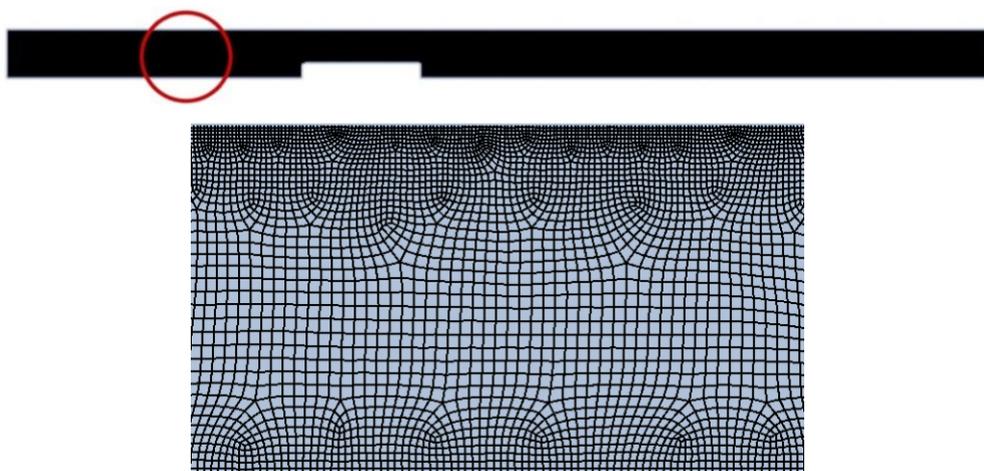


Ilustración 2-14: Representación Mallado Base (BR3)

Sección Cápsula

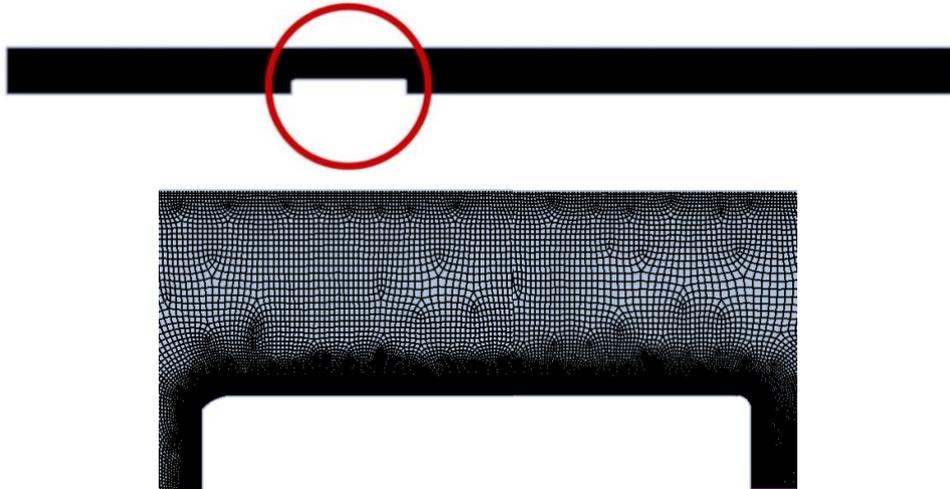


Ilustración 2-15: Representación Mallado Cápsula (BR2)

Sección Túnel Aguas Abajo

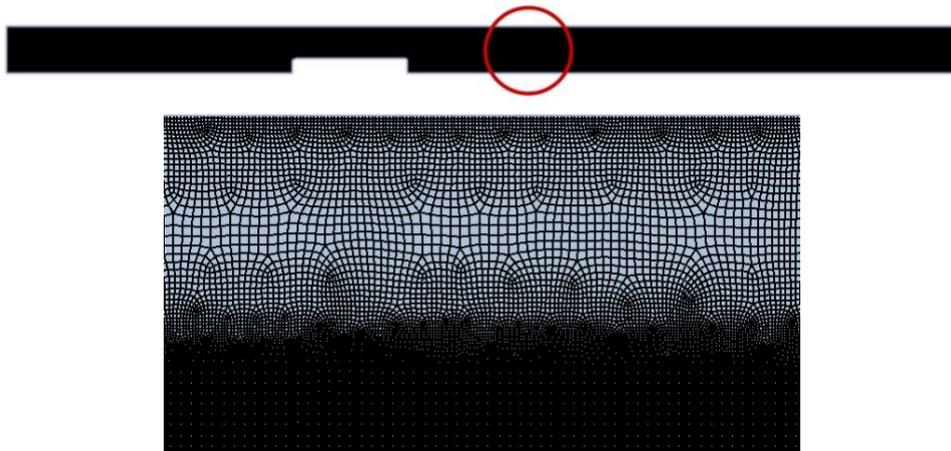


Ilustración 2-16: Representación Mallado Estela (BR2)

Al examinar las mallas producidas en las diferentes secciones, se puede determinar que son correctas para el caso de estudio, ya que en este caso las capas prismáticas de cápsula y estela se enlazan de mejor manera con la de la pared superior, dejando menos superficie de malla con menor refinamiento. Esto es así ya que, como se ha nombrado anteriormente, en este caso particular es necesario capturar los posibles sucesos que se den entre la pared superior y la sección afectada por la presencia del vehículo. Esto hace referencia a la reducción de error numérico asociado a la resolución del muestreo de la capa límite y los fenómenos de separación.

Con esta última configuración, se da por terminada, de forma fructuosa, la sección de mallado. A continuación, y siguiendo el orden establecido por el programa de simulaciones, se dará paso a la sección de modelado físico de los sistemas.

2.3 MODELADO FÍSICO DE LAS SIMULACIONES

La siguiente configuración por establecer, es la relacionada con el modelado físico de las simulaciones. A través de los modelos físicos, se establecen, de forma matemática, las leyes de la física que gobernarán el comportamiento del fluido, así como su interacción con las diferentes superficies que componen el sistema. De esta forma, se podría llegar a decir que cada modelo seleccionado proporciona una aproximación de cómo se desarrollarán los fenómenos en

diversas condiciones. Un aspecto crucial reside en que estas condiciones se asemejen, dentro de lo posible, a las operativas del sistema real.

En primer lugar, la condición más importante a establecer es la de imponer un modelo **Axisimétrico**. Este se situará como la base para poder reducir en gran medida el coste computacional, ya que al asumir simetría alrededor del eje central se consigue basar el análisis únicamente en la mitad superior del sistema, lo que disminuye la exigencia del software prácticamente a la mitad, permitiendo tener tiempos de evaluación de magnitudes agradables y asumibles.

A continuación, se escenifica el sistema mostrando el eje de simetría que se ha asumido:



Ilustración 2-17: Eje de Simetría en Sistema Completo

Una vez establecida la base operativa del estudio, la primera suposición física que se realiza para este sistema son las propiedades que el flujo presentará. Para ello se ha seleccionado el modelo de **Gas Ideal**, mediante el cual se asume que el gas se comporta según la ecuación de estado de los gases ideales ($PV = nRT$), donde la presión, volumen y temperatura se relacionan de linealmente. Esta elección será la base para poder presentar simulaciones lo suficientemente precisas, manteniendo un coste computacional razonable.

Una de las consideraciones más importantes que se establece para este modelo es la de un sistema **Steady**, a través de la cual se establece que las condiciones del sistema no varían con el tiempo, es decir, las distintas propiedades del sistema son constantes en cualquier punto del dominio. Esta elección se ha dado ya que aplicando condiciones estacionarias el análisis se simplifica de forma significativa, al no tener que resolver ecuaciones correspondientes al flujo en cada instante temporal, lo que aumentaría de forma exponencial la exigencia al software. Además, en este caso se considera como válida esta suposición ya que, al establecer una velocidad aerodinámica constante para la cápsula, la precisión en la obtención de fuerzas aerodinámicas actuantes es adecuada ya que se busca obtener parámetros solo de diseño.

Ahora, es conveniente establecer los modelos que se aplicarán sobre el comportamiento del flujo. Para ello se usará, en primera instancia, el modelo de **“Coupled Flow”** [18], que se encarga de resolver de forma simultánea las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía. De esta forma se puede capturar con una gran precisión las interacciones entre las diferentes variables que describen el flujo ya que se evalúan de forma conjunta e integral.

En segunda instancia, se hará uso de la condición de **“Coupled Energy”** [19]. La finalidad de este es acoplar las ecuaciones de energía junto con aquellas referentes a la cantidad de movimiento y continuidad. La principal funcionalidad de esto es el poder considerar la transferencia de calor y energía de forma conjunta, lo que potencia a precisión de la simulación. Además, se proporciona información detallada de la distribución y disipación del calor en el sistema ya que considera la influencia de la temperatura sobre las características del flujo.

Una vez compuesto el comportamiento del flujo, se puede pasar a constituir cómo se realizará la obtención de resultados y en qué condiciones y metodología. Se empezará por abordar la necesidad de obtener la solución del sistema con la suficiente precisión, lo que conlleva hacer uso de la capacidad del programa para realizar una **“Solution Interpolation”**, mediante la cual, se interpolan valores entre los nodos de la malla. A través de este proceso, se estimula un análisis más preciso y detallado, ya que la mejora al capturar los gradientes y

transiciones del flujo es exponencial [20]. Asimismo, este modelo incentiva la reducción de error numérico, evitando cambios abruptos entre las celdas, y, por lo tanto, inexactitudes o comportamientos anómalos en la solución.

Una vez se ha elegido el formato de estudiar el sistema, es pertinente seleccionar el modelo que regirá el comportamiento turbulento del fluido. Para esta función, se ha optado por el modelo **SST K-Omega**, debido a su capacidad para combinar las ventajas de los modelos k-epsilon y k-omega. Esta elección viene dada ya que la formulación k-omega permite resolver la zona que se halla cerca de la pared, es decir, el comportamiento de la capa límite, mientras que el modelo k-epsilon es útil para capturar el flujo turbulento situado en la región libre de la corriente [21]. Esta dualidad resolutoria es de especial importancia dado que las interacciones del flujo que se generan alrededor del Hyperloop son de naturaleza compleja, debido a su alta velocidad y encerramiento de su alrededor.

Para resolver el comportamiento del fluido a través del sistema SST K-Omega, sería pertinente conocer qué modelo matemático es el que se usa para detallar la turbulencia del flujo. Este ha sido el **Reynolds-Averages Navier-Stokes (RANS)**, el cual se encarga de modelar los efectos del fluido turbulento promediando en el tiempo las ecuaciones de Navier Stokes [22]. De esta forma se permite evitar tener que resolver cada fluctuación, por insignificante que sea, reduciendo, por lo tanto, la exigencia computacional.

El siguiente modelo físico tomado es el **All y+ Wall Treatment** [23], el cual permite de una forma flexible adoptar todo el espectro de valores y^+ . El valor de y^+ indica la distancia, de forma adimensional, entre la pared del elemento de estudio, y el centro de la primera celda de la malla que se encuentra a su alrededor [24].

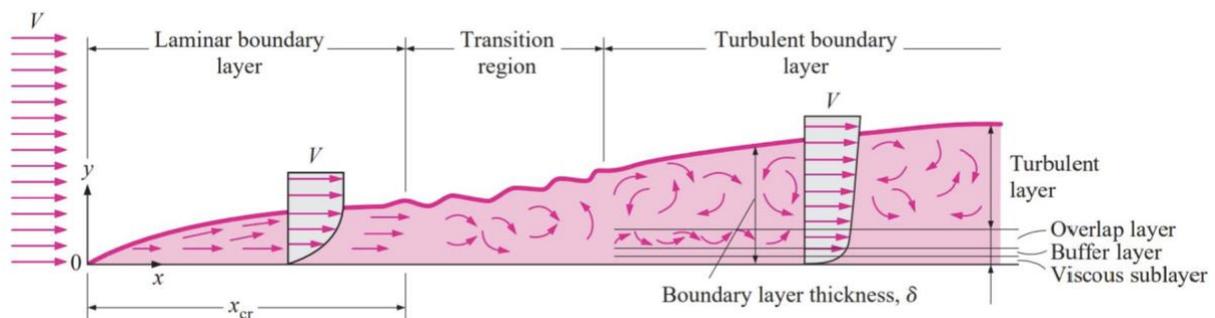


Ilustración 2-18: Capa Límite Superficie

Como se puede observar en la imagen, este parámetro puede adoptar diferentes valores dependiendo de la focalización que se busque al tratar la capa límite del flujo: valores pequeños resuelven la capa laminar y valores altos asumen que la celda se encuentra en la región logarítmica de la capa límite, es decir, la región turbulenta [25]. Al imponer la condición de adaptar cualquier valor de y^+ , se proporciona una solución capaz de adaptarse a una amplia gama de condiciones y comportamientos del flujo. Esto es necesario ya que, al desplazarse el Hyperloop a velocidades relativamente altas, se puede predecir una generación de capa límite y turbulencia cerca de la superficie.

Una vez seleccionado el modelo deseado para el parámetro y^+ , se puede comprender de mejor manera la importancia que supone estimar de forma correcta y precisa la distancia de cualquier punto del dominio hasta la pared más cercana, ya que el comportamiento del flujo se ve altamente influenciado por esta característica. Por este motivo, para las simulaciones que ocupan este trabajo, se hará uso del modelo **wall distance**, herramienta que permitirá aportar

información de crucial importancia a la hora de resolver el tratamiento de la capa límite o la turbulencia.

A continuación, se presenta una tabla donde se estipula todos los modelos seleccionados a modo resumen:

MODELOS SELECCIONADOS
Axisimetría
Gas Ideal
Estacionario
Coupled Flow
Coupled Energy
Solution Interpolation
Modelo turbulento SST K-Omega
Resolución mediante RANS
All y+ Wall Treatment
Wall Distance

Tabla 2-8: Modelos Físicos Seleccionados

Con esto se da por finalizada la etapa dedicada a establecer el modelaje físico del sistema. La principal finalidad tras todas las condiciones y modelos seleccionados es la de permitir un análisis que se amolde de la mejor manera posible a la naturaleza operativa del Hyperloop, para así poder asegurar simulaciones adecuadas capaces de obtener resultados fiables y útiles para este propio estudio.

2.4 CONDICIONES DE CONTORNO

Siguiendo los pasos establecidos a la hora de realizar la metodología del trabajo, una vez se ha definido la geometría, realizado el mallado y seleccionado los modelos físicos, es momento de establecer las condiciones de contorno del estudio. A través de estas se especifica qué valores adoptan las variables del flujo en diferentes partes del dominio, con el objetivo de asemejarse lo máximo posible a las condiciones operativas reales del Hyperloop, modelando como el aire interactúa en el túnel.

Para describir estas características, se divide el sistema en diferentes subregiones que permitirá asignar a cada sección del dominio los parámetros de flujo correspondientes, así como mejorar la coherencia de la simulación.



Ilustración 2-19: Condiciones de Contorno

2.4.1 CONDICIONES DE SIMETRÍA

Tal y como se ha especificado en el apartado anterior, se considera una condición de simetría alrededor del eje central del sistema, por lo que se analizará únicamente la mitad superior del túnel, extrapolando los resultados obtenidos en esta parte a la mitad inferior.

2.4.2 CONDICIONES DE ENTRADA (INLET)

En esta sección se especificará los valores que sostienen las variables que describen el flujo en la sección correspondiente a la entrada del dominio de la simulación. Esta parte se ha configurado como una entrada de flujo con velocidad con las siguientes características:

- **Temperatura Estática:** *Sujeta a efectos inducidos*
- **Intensidad Turbulenta:** 0.01
Una intensidad turbulenta del 1% induce un flujo suave, con perturbaciones iniciales mínimas
- **Relación Viscosidad Turbulenta:** 10
- **Velocidad:** *Sujeta a efectos inducidos*

En la superficie de la entrada, la temperatura y velocidad se encuentran sujetas a efectos inducidos que serán explicados posteriormente al configurar los diferentes casos de estudio.

2.4.3 CONDICIONES DE PARED (WALL) / CÁPSULA (POD)

A través de las opciones de contorno establecidas en esta superficie, se modela las condiciones bajo las cuales el flujo interactuará con la pared del túnel. Además, Las superficies que conforman la cápsula se han establecido todas como “pared”, por lo que sus propiedades son idénticas. A continuación, sus características:

- **Especificación de Esfuerzo Cortante:** No-Slip
Esta condición supone que, en los bordes superior e inferior del túnel, la velocidad del fluido tendrá una velocidad de 0 con respecto a la pared
- **Especificación Térmica:** Adiabático
Implica que no hay intercambio de calor a través de las paredes del sistema, por lo que estas superficies no afectan a la temperatura del flujo.
- **Especificación Superficie de la Pared:** Smooth
La pared no contiene ningún tipo de rugosidad, es completamente lisa.
- **Función de Pared Combinada:** $E = 9$; $Kappa = 0.42$
Parámetros que establecen como interactúa el flujo con la pared del sistema.
- **Velocidad Relativa:** [100, 0, 0] o [125, 0, 0] o [150, 0, 0], dependiendo del caso.



2.4.4 CONDICIONES DE SALIDA (OUTLET)

Esta sección se ha especificado como una salida de presión indicando la forma en la que el aire sale del túnel. Para ello se determina las características que presenta el flujo en la siguiente sección:

- **Presión Estática:** *Sujeta a efectos inducidos*
- **Temperatura Estática:** 299.5 K
- **Intensidad Turbulenta:** 0.01
Una intensidad turbulenta del 1% induce un flujo suave, con perturbaciones iniciales mínimas
- **Relación Viscosidad Turbulenta:** 10

Al igual que en la sección de entrada, para este caso la presión de salida se encuentra sujetas a efectos inducidos que serán explicados posteriormente al configurar los diferentes casos de estudio.

Esta definición adecuada de las condiciones de contorno es esencial para garantizar la efectividad de las soluciones, por lo que, una vez realizado esto, se puede proceder con la siguiente parte de este trabajo, la cual hace referencia a la configuración de los diferentes casos de estudio.

3. RESULTADOS

Tras haber analizado la metodología seguida para el establecimiento de las simulaciones, teniendo en cuenta su geometría, mallado, modelado físico y condiciones de contorno, en esta sección se abordará las partes correspondientes a la configuración final de los diferentes casos de estudio y el análisis de los resultados obtenidos.

En primer lugar, se tratará de establecer de forma clara los diferentes escenarios operativos a evaluar. Para ello, es necesario establecer un marco metodológico que tenga en cuenta las condiciones específicas de cada uno de ellos, ya que el procedimiento establecido en la parte anterior tiene un carácter general. La definición adecuada de los parámetros que faltan por establecer es un proceso clave, el cual se definirá con detenimiento también en las secciones que prosiguen.

Una vez configurados los casos y tras la ejecución final de estos, llegaría el momento de analizar los resultados finales obtenidos. Este proceso abarca el análisis de los datos recogidos, enfocándose en evaluar parámetros clave, identificar comportamientos aerodinámicos y validar los hallazgos obtenidos. El propósito es llegar a conclusiones valiosas que contribuyan a mejorar y optimizar el diseño del sistema.

3.1 CONFIGURACIÓN DE LOS CASOS

A la hora de establecer la configuración final de los casos, se seguirá el modelo establecido en el artículo publicado por J. Galindo, R. Navarro y L. García-Cuevas, B. Pallás titulado “*Development of cost-effective CFD modeling techniques for transient missions of hyperloop vehicles*” [26] donde se aborda el desarrollo de técnicas rentables de modelado CFD, entre las cuales se trata el procedimiento que se establecerá para este trabajo, y el cual será desglosado a continuación.

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO APQSS

El modelo APQSS (A Priori Quasi-Estacionario) es elegido, principalmente, por 2 motivos:

1. Por su capacidad de predecir el comportamiento del sistema Hyperloop sin necesidad de imponer condiciones de contorno correspondientes a comportamientos no estacionarios. Esto es así ya que la configuración de estos casos se ejecuta de manera predictiva, como se explicará en la siguiente sección.
2. Por su bajo coste computacional, lo que permite la realización de simulación extensas bajo condiciones complejas, sin un gran consumo de recursos.

Mediante esta selección, se permite obtener un enfoque especialmente simplificado, lo que agiliza el proceso de las simulaciones, proporcionando una aproximación eficiente. Además, el modelo APQSS mantiene una cohesión total con la elección de los modelos físicos elegidos anteriormente, especialmente al imponer un sistema estacionario.

Para poder comprender de mejor manera la elegibilidad del modelo A Priori Quasi Estacionario, habría que hacer referencia a fenómeno de la velocidad inducida, el cual se explica en el siguiente apartado.

3.1.2 VELOCIDAD INDUCIDA

En el contexto del Hyperloop, existe un fenómeno el cual no se suele tener en cuenta, pero que sin embargo presenta una importancia crítica. Se trata de la velocidad inducida.

Esta velocidad hace referencia a la velocidad adicional que se genera debido al movimiento del vehículo dentro del túnel, ya que este desplazamiento crea ondas de presión y velocidad que no se disipan o propagan de una manera uniforme. Por este motivo, y debido a la naturaleza confinada del sistema, la velocidad que es percibida por la cápsula es menor a la impuesta en las paredes del sistema. Vista la importancia de este comportamiento, se muestra claramente que no puede ser ignorado, por lo que hay que tartar el proceso necesario para su cálculo.

3.1.2.1 Cálculo Velocidad Inducida

Para poder predecir de manera correcta estos efectos, es fundamental calcular la velocidad inducida del sistema siguiendo las premisas establecidas en el modelo APQSS, es decir, de forma predictiva, a través de un proceso iterativo. Este procedimiento garantiza que las condiciones de entrada y salida se ajustan para representar correctamente las interacciones en movimiento del flujo, estableciendo así una base sólida y con la máxima precisión posible para el estudio aerodinámico del Hyperloop.

La estrategia iterativa se basa en seguir los siguientes pasos:

1. Cálculo del Caso Base:

A la hora de configurar el caso base, los parámetros de interés deben tomar los siguientes valores:

- **Velocidad de Entrada (V_{inlet}):** Igual a la velocidad de la pared (V_{wall}), que dependerá del caso de estudio, estableciéndose como condición inicial de simulación.
- **Presión (P_{outlet}):** Se iguala a la presión inicial ($P_{ini} = 9999 Pa$), configurando las condiciones de presión de partida.
- **Temperatura (T_{inlet}):** Se fija igual a la temperatura inicial ($T_{ini} = 300 K$), representando las condiciones ambientales esperadas.

El proceso consiste en realizar una simulación inicial bajo estas condiciones y obtener una caída de presión entre la parte de entrada y salida del túnel (ΔP)

2. Corrección de la Velocidad de Entrada:

Con la caída de presión calculada, se ajusta la velocidad de entrada utilizando la suposición de ondas débiles. La velocidad absoluta en la parte frontal se ajusta según la siguiente fórmula:

$$V_{inlet} = V_{wall} - \frac{\Delta P}{2 \cdot (\rho \cdot a)_f} \quad [2]$$

Ecuación 3-1: Corrección Velocidad Entrada

3. Ajuste de la Presión

La presión en la parte trasera (P_{outlet}) de la cápsula se ajusta de la siguiente manera:

$$P_{outlet} = P_{ini} - \frac{\Delta P}{2} \quad [3]$$

Ecuación 3-2: Corrección Presión Salida

4. Ajuste de la Temperatura de Entrada:

Flujo Isentrópico: Se asume un flujo isentrópico para corregir la temperatura de entrada (T_{inlet}), obteniendo nuevos valores de temperatura:

$$T_{inlet} = T_{ini} \cdot \left(\frac{P_{ini} + \frac{\Delta P}{2}}{P_{ini}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [4]$$

Ecuación 3-3: Corrección Temperatura Entrada

5. Iteración:

Proceso Iterativo: Los pasos 2 y 3 se repiten iterativamente hasta que la diferencia en la presión (ΔP) entre la iteración “n” y “n-1” converja a un valor lo suficientemente similar, con una magnitud de diferencia máxima del 5%. Este proceso asegura que las condiciones de contorno se ajusten de manera precisa, reflejando las dinámicas del flujo en un estado cuasi-estacionario.

3.1.3 CONFIGURACIÓN FINAL

Tras realizar este proceso iterativo para los distintos Blockage Ratio y velocidades dispuestas, la configuración final de los casos quedan resumidas en las siguientes tablas:

	<u>BR1 – 0.3844</u>	<u>BR2 – 0.1922</u>	<u>BR3 – 0.0961</u>
Valores Corrección ($V_{wall} = 100 \frac{m}{s}$)			
$V_{inlet} [\frac{m}{s}]$	95.284	99.482	99.828
$P_{outlet} [Pa]$	9898.609	9987.855	9995.308
$T_{inlet} [K]$	300.866	300.095	300.032
Valores Corrección ($V_{wall} = 125 \frac{m}{s}$)			
$V_{inlet} [\frac{m}{s}]$	115.701	124.058	124.682

P_{outlet} [Pa]	9800.051	9978.755	9992.163
T_{inlet} [K]	301.702	300.173	300.059
Valores Corrección ($V_{wall} = 150 \frac{m}{s}$)			
V_{inlet} [$\frac{m}{s}$]	150	148.225	150
P_{outlet} [Pa]	9999	9960.837	9999
T_{inlet} [K]	300	300.327	300

Tabla 3-1: Condiciones Operativas Casos 1,2 y 3

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez se ha descrito la configuración de los diferentes casos a tratar, se puede llevar a cabo el análisis de los resultados y simulaciones obtenidos en STAR-CCM+. El objetivo principal de esta sección es comparar el comportamiento aerodinámico del Hyperloop bajo diferentes ratios de bloque y velocidades operativas, como ya se ha descrito previamente. Para poder realizar este estudio de manera pertinente y ajustándose a los criterios relevantes para el sistema de estudio, es importante tratar los parámetros pertinentes de interés. El **número de Mach** es fundamental ya que presenta la relación entre la velocidad del flujo y la velocidad del sonido, lo que es de crucial importancia para poder identificar aquellas secciones en las que el flujo tiende a acercarse a cualidades transónicas y/o supersónicas. Por otro lado, la **velocidad inducida** es crucial para evaluar como la interacción del flujo con el túnel afecta la velocidad que percibe la cápsula. Además, la **presión absoluta** permite comprender en que punto las fuerzas aerodinámicas actuantes son de mayor o menor intensidad, lo que permite identificar las regiones donde se genera resistencia adicional o aquellas que puedan afectar a la estabilidad del vehículo. Finalmente, la **resistencia aerodinámica** se trata de un indicativo directo del consumo de energía que sería necesario para hacer funcionar el Hyperloop en unas condiciones operativas concretas. Por este motivo, un objetivo claro de estudio sería buscar la reducción en la resistencia, lo que ayudaría a reducir las turbulencias generadas.

Dadas las bases del análisis, es pertinente realizar una breve explicación de cuál será la metodología de análisis que se seguirá. En primer lugar, los datos obtenidos a través de las simulaciones por CFD se mostrarán a través de imágenes donde se ilustre la distribución de cada uno de los parámetros, para así realizar una evaluación de estos de la manera más visible posible. Esta forma de actuar permitirá realizar un análisis en el cual se compararán los resultados entre las diferentes ratios de bloqueo y velocidades, con la intención de identificar patrones, tendencias y determinar que configuraciones ofrecen el mejor desempeño aerodinámico, así como las posibles áreas de mejora u optimizaciones disponibles.

Por último, cabe destacar que los hallazgos de este análisis supondrán una base crucial para la realización de los siguientes apartados de este trabajo.

3.2.1 ANÁLISIS CASO BASE (125 m/s)

En primer lugar, se procederá con el estudio del caso base, en el que el flujo está supuesto a una entrada en el túnel de 125 m/s.

3.2.1.1 Número de Mach

Este primer estudio tratará de examinar el comportamiento de Número de Mach en función de los diferentes ratios de bloqueo.

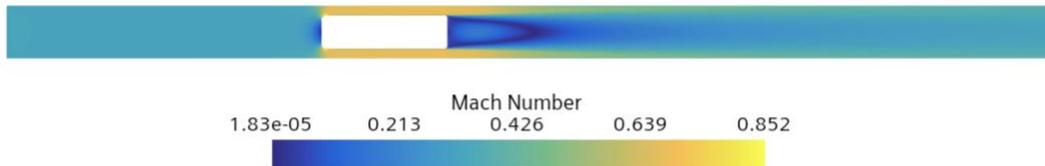


Ilustración 3-1: Evolución Número Mach (BR1/125)

Considerando que el flujo entra en el sistema con un Mach aproximado de 0.34, se puede apreciar el siguiente comportamiento de flujo a lo largo del sistema. En la parte frontal de la cápsula, el flujo de aire se estanca debido a la obstrucción de paso que supone la sección completamente plana del vehículo, lo que impide que avance el aire, decelerándolo hasta prácticamente llegar a 0. Después de esta región, el flujo se ve forzado a rodear la cápsula, provocándose una aceleración de este hasta Mach 0.58, como resultado de la reducción de área transversal disponible para su paso, siguiendo así la ley de continuidad de flujo másico. Una vez se ha superado el obstáculo, el número de Mach disminuye gradualmente a medida que el flujo se expande y decelera, formando una estela. Además, se observa una zona de recirculación justo detrás de la cápsula, lo que induce la aparición de una zona turbulenta formando vórtices. Este fenómeno viene dado por el mismo motivo que la zona de estancamiento inicial, lo que viene a ser un cambio de geometría abrupto y cuyos efectos aerodinámicos pueden ser el incremento notable de la resistencia aerodinámica.

A continuación, se puede observar dos imágenes a través de las cuales se puede comprender de una forma más ilustrativa el comportamiento del flujo en la parte trasera de la cápsula.

La primera imagen muestra el movimiento de las líneas de corriente alrededor de la cápsula. En concreto, sería pertinente centrarse en cómo en la zona de posterior, tras desplazarse hacia los lados, las partículas de aire comienzan a desplazar a la vez que giran formando vórtices, lo que provoca que la corriente de aire se curve de manera brusca y comience a fluir hacia atrás para más tarde reintegrarse con la corriente de aire de los lados superior e inferior. Esta imagen servirá para poder comparar la magnitud de la zona de recirculación con el resto de los casos.

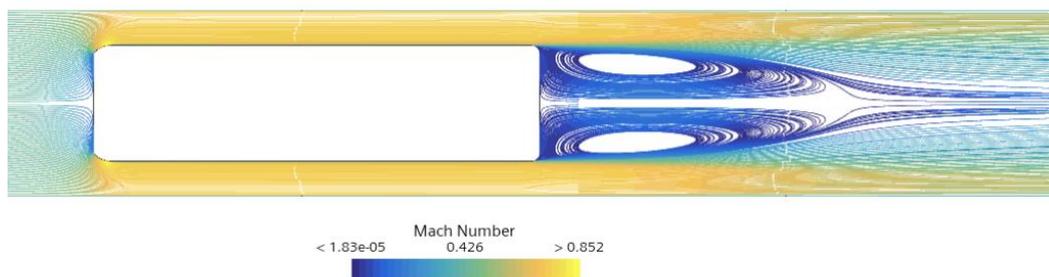


Ilustración 3-2: Evolución Líneas de Corriente (BR1/125)

La segunda imagen es un gráfico XY en la cual se muestra el avance del número de Mach a lo largo de 2 líneas que recorren el dominio del sistema: una por encima de la cápsula y otra a lo largo del eje de simetría. Se puede observar cómo el flujo superior decelera mientras que el central aumenta el número de Mach hasta confluir en un mismo valor de velocidad. Esta igualdad se consigue cuando el flujo llega a lo que se considera el final del túnel de estudio, lo que demuestra una gran turbulencia en el aire. Esta evolución servirá de referencia para poder comparar el rango de estela de los otros 2 sistemas de estudio.

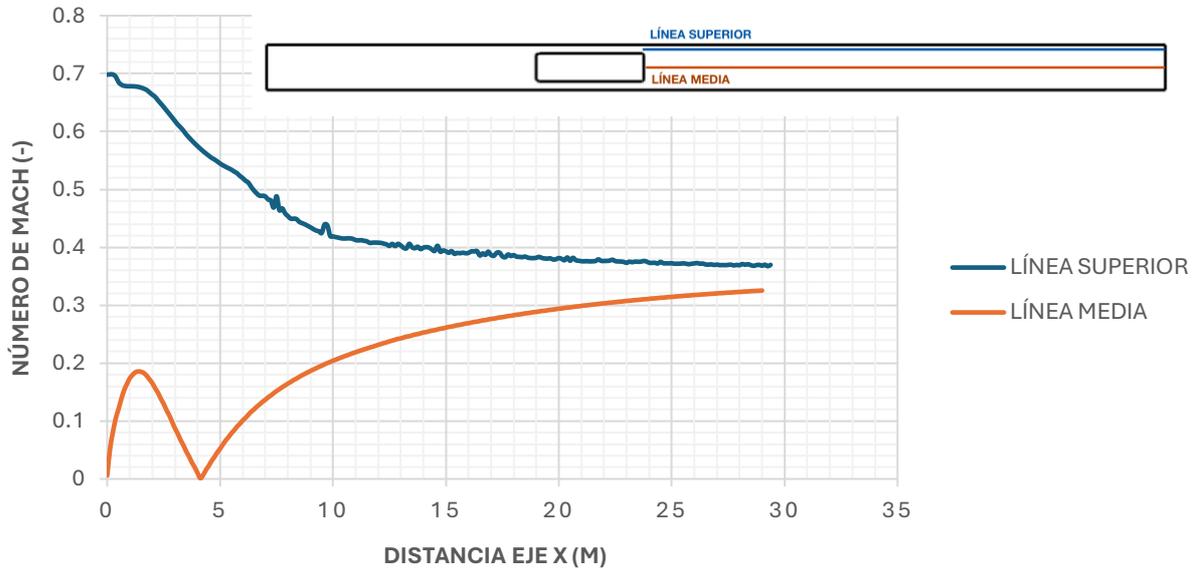


Ilustración 3-3: Evolución Mach en Dirección X (BR1/125)

A continuación, se presentan las simulaciones correspondientes a los otros 2 casos de estudio:

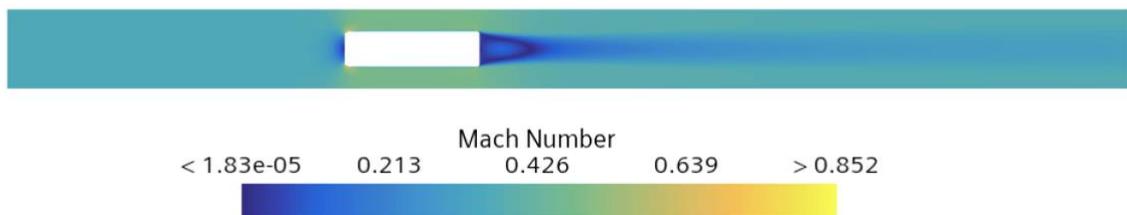


Ilustración 3-4: Evolución Número Mach (BR2/125)

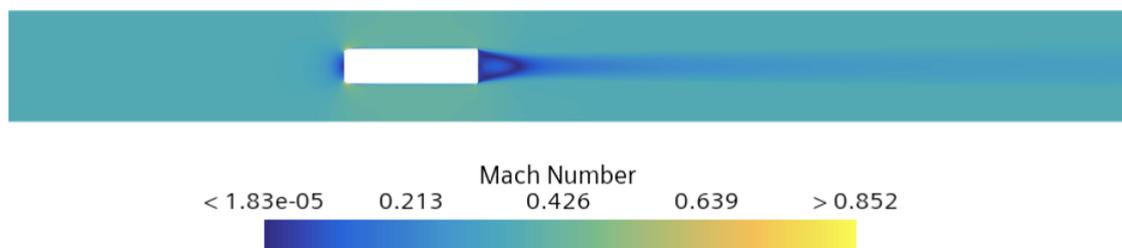


Ilustración 3-5: Evolución Número Mach (BR3/125)

Se puede observar cómo la zona de estancamiento inicial no difiere en gran medida del primer caso, esto se debe a que la velocidad teórica de entrada es la misma para las 3 simulaciones, teniendo en cuenta que, además, el área transversal del vehículo no varía. No obstante, la aceleración del flujo alrededor de la cápsula si sufre una reducción drástica en

magnitud como consecuencia del aumento del diámetro del túnel, lo que provoca una compresión del aire mucho menos pronunciada. Para poder escenificar mejor este hecho, se puede establecer un incremento de la Mach de, aproximadamente, 0.36 a 0.48 para el caso con BR2 y un aumento de 0.36 a 0.41 para el diámetro de túnel correspondiente a BR3.

Una vez superada la región correspondiente a la cápsula, se puede identificar como la pronunciación de la zona de recirculación es menor a medida que se establece un menor ratio de bloqueo. Esto provoca una correspondiente reducción en la perturbación del flujo, y por lo tanto un restablecimiento de la corriente inicial cada vez más rápida a medida que se establece un diámetro de tubo mayor, lo que se puede identificar en el progresivo estrechamiento de la estela del flujo. Esta notable disminución en la magnitud y extensión de las zonas de recirculación se puede identificar de manera gráfica a través de la evolución de las líneas de corriente en ambos casos, las cuales se identifican en las imágenes que se muestran:

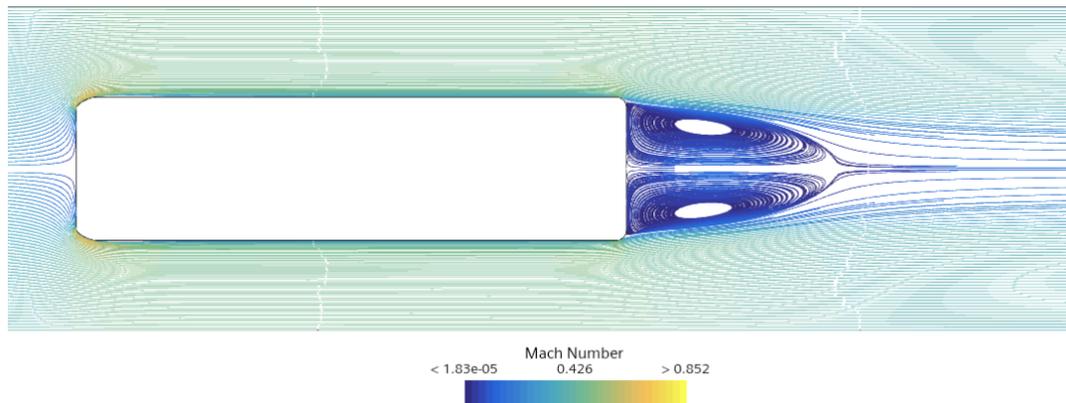


Ilustración 3-6: Evolución Líneas de Corriente (BR2/125)

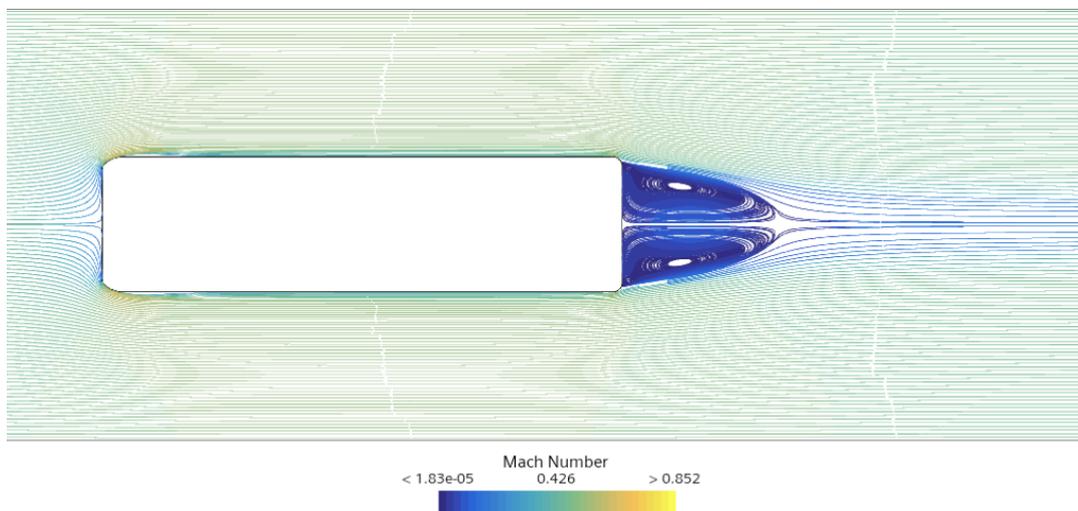


Ilustración 3-7: Evolución Líneas de Corriente (BR3/125)

A parte del comportamiento de las “streamlines” que se acaba de escenificar, los gráficos correspondientes a la evolución del número de Mach con respecto a la dirección X muestran como la convergencia de las velocidades en los niveles superior y medio hacia valores consistentes se realiza de forma más rápida y uniforme al aumentar el diámetro del túnel. Esto provoca que el flujo se acerque a un valor constante a lo largo de más parte del recorrido del conducto, lo que implica un acercamiento al régimen laminar por parte de los sistemas que sostienen las características de BR2 y BR3. El siguiente gráfico sostiene la información presentada:

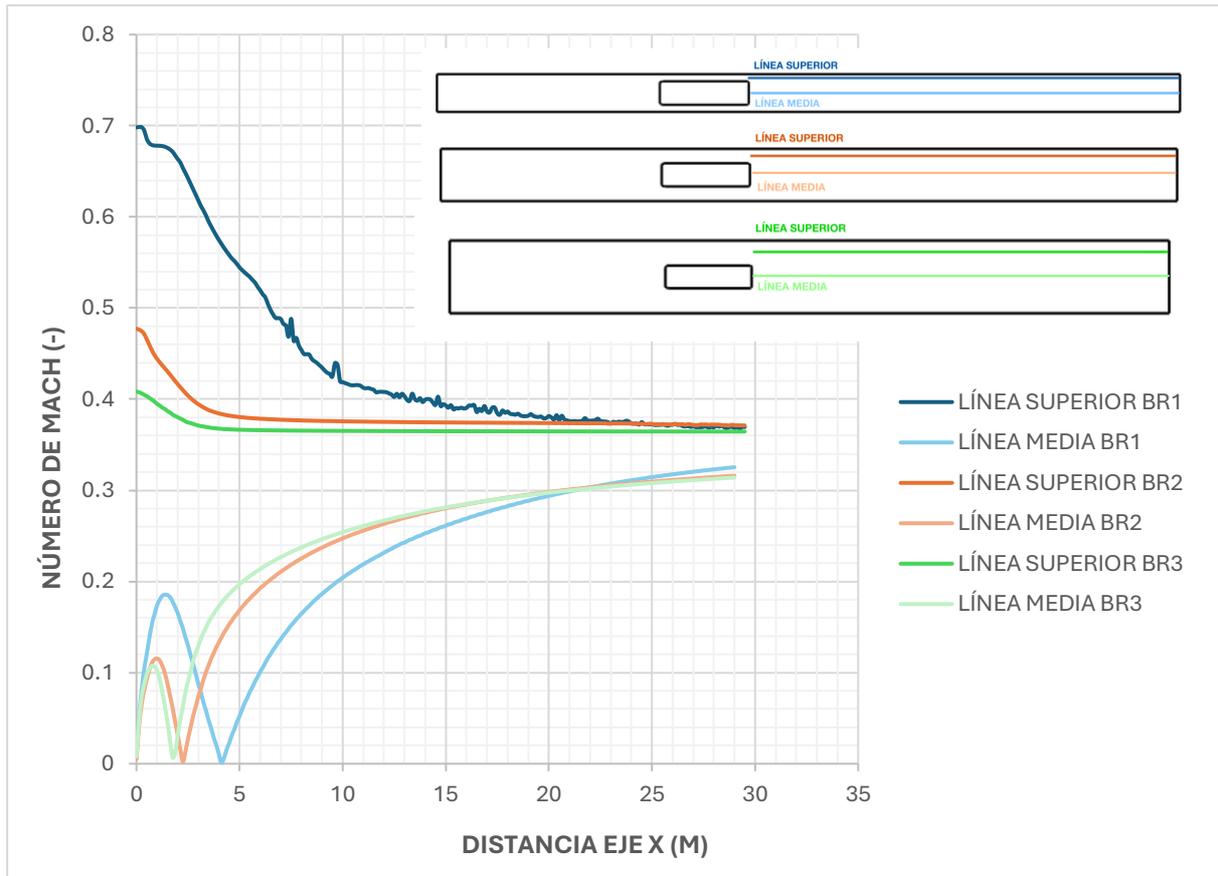


Ilustración 3-8: Evolución Mach en Dirección X (BR2, BR3/125)

3.2.1.2 Velocidad Inducida

Teniendo en cuenta el análisis realizado previamente en cuanto al número de Mach, sería pertinente realizar un estudio para poder estudiar como varía la velocidad inducida para cada simulación. Los valores obtenidos para cada configuración se pueden observar en la siguiente tabla:

Valores Corrección ($V_{wall} = 125 \frac{m}{s}$)	
(BR1) $\rightarrow V_{inlet} \left[\frac{m}{s} \right]$	115.701
(BR2) $\rightarrow V_{inlet} \left[\frac{m}{s} \right]$	124.058
(BR3) $\rightarrow V_{inlet} \left[\frac{m}{s} \right]$	124.682

Tabla 3-2: Valores Corrección Velocidad Inducida a 125 m/s

Tal y como se puede identificar, a medida que el diámetro del túnel aumenta, se puede observar una notable convergencia de la velocidad de entrada hacia la velocidad nominal de la pared del túnel, que es de 125 m/s. Estableciendo una relación con lo dicho en el punto 3.1.2 VELOCIDAD INDUCIDA se conoce que el desplazamiento del vehículo en un conducto cerrado provoca ondas de presión que modifican la dinámica del flujo aéreo. Esta interacción resulta de

mayor intensidad en el caso del ratio de bloqueo mayor, donde la proximidad entre las paredes del túnel y la cápsula provocan una amplificación de estos efectos ondulatorios, reduciendo la velocidad percibida hasta los 115.701 m/s. No obstante, la disminución progresiva del ratio de bloqueo permite desarrollar una mejor disipación de la energía provocada por estas ondas de presión, lo que viene como resultado de generar espacio adicional entre las paredes del vehículo y el conducto. Esta menor compresión de aire generada desemboca en una reducción en la disparidad entre la velocidad de entrada y aquella de la pared, siendo de 124.058 m/s para el BR2 y 124.682 para el BR3. Cabe destacar que el salto en la diferencia de velocidad entre el ratio 1 y el 2 es mucho mayor que la diferencia entre el ratio 2 y 3, lo que supone un factor importante a tener en cuenta para las posibles conclusiones posteriores.

3.2.1.3 Presión Absoluta

La distribución de presiones en el sistema de Hyperloop resulta un análisis de importancia ya que supone la base para poder estudiar posteriormente como impacta el ratio de bloqueo en el desempeño aerodinámico del sistema. En primer lugar, se pretende investigar cómo actúa la presión absoluta a lo largo de las diferentes regiones para el caso con mayor ratio de bloqueo.



Ilustración 3-9: Evolución Presión Absoluta (BR1/125)

Tal y como se puede observar, la zona frontal experimenta una alta presión debido al efecto de estancamiento nombrado previamente, lo que provoca una frenada brusca del flujo y su consecuente aumento drástico de presión, generando una interacción intensa entre el aire de entrada y sección transversal del vehículo. Esto es un gran indicativo de un aumento fuerte de la resistencia frontal, lo que se corroborará en apartados siguientes. Avanzando a través del sistema, en el momento en el que el aire se ve obligado a desviarse hacia las zonas que rodean la capsula, se generan gradientes de presión de magnitud importante, reduciendo la presión presente de forma contundente. Pese a que este fenómeno no supone grandes inestabilidades en la configuración actual, habría que prestar atención en el resto de los casos, ya que podrían inducir flujos turbulentos de gran calibre y por lo tanto afectar de forma crítica a la eficiencia del sistema. Una vez se ha superado el obstáculo, detrás de la cápsula la presión aumenta con la intención de recuperar el estado inicial de entrada, de esta forma se puede corroborar que a pesar de que la presión se ve reducida drásticamente alrededor y en la zona justo posterior del vehículo, el sistema vuelve a estabilizarse reduciendo la posible formación de vórtices prolongados en la zona de recirculación, como se ha podido observar en el estudio sobre el número de Mach.

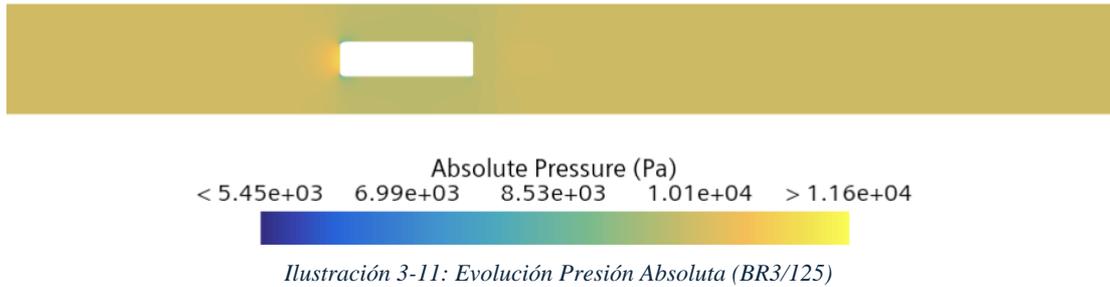
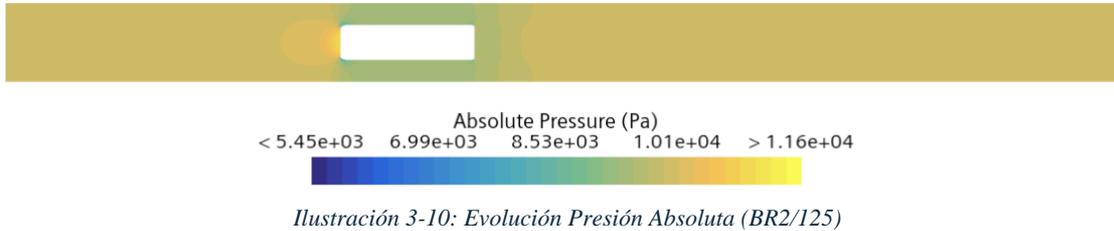
Todo este proceso dentro del sistema se traduce en un salto de presión de:

Salto de Presión BR1 a $125 \frac{m}{s}$ ($\Delta P_{BR1/125}$) [Pa]
7.998e + 02

Tabla 3-3: Valores Salto Presión a (BR1/125)

Esto indica una alta compresión de aire delante de la cápsula y una expansión notable tras ella, aunque sin llegar a volver a un estado similar al de entrada.

A continuación, se presentan las simulaciones correspondientes a los otros 2 casos de estudio:



Una primera característica que resaltar en ambos casos es la reducción en la presión frontal del sistema, con un efecto de estancamiento menos severo que en el primer caso, debido a un mayor espacio para el flujo de aire. En especial, en el caso con el menor ratio de bloqueo, se puede observar como el bloqueo del flujo es prácticamente mínimo, lo que es un indicativo de una interacción eficiente entre la cápsula y el flujo “a priori”. Una vez el aire pasa a la zona que rodea el vehículo, se puede observar como la presión es más estable y homogénea en comparación con el caso de BR1. Pese a que en el segundo caso sigue habiendo una compresión notoria en la región comprendida entre la pared del vehículo y el túnel, el caso correspondiente al BR3 muestra una adaptación mucho más fluida alrededor de la cápsula, reflejando un flujo casi laminar. Por último, la presión en la parte posterior presenta una rápida recuperación, lo que induce una mejora en la gestión del flujo de aire y una reducción en la resistencia por estela. En el caso con el diámetro de conducto más grande, esta presión vuelve casi a los valores iniciales, mejorando la eficiencia del sistema a través de una mínima formación de vórtices.

El análisis de las distribuciones de presiones en estos dos casos se traduce en los siguientes saltos de presión:

Salto de Presión a $125 \frac{m}{s}$	
BR2 ($\Delta P_{BR2/125}$) [Pa]	8.106e + 01
BR3 ($\Delta P_{BR3/125}$) [Pa]	2.704e + 01

Tabla 3-4: Valores Salto Presión (BR2, BR3/125)

Los saltos de presión observados indican una mejora muy significativa en los ratios de bloqueo 2 y 3 en comparación con el 1, habiendo una diferencia de hasta un orden de magnitud en los saltos de presión.

3.2.1.4 Resistencia Aerodinámica

La resistencia aerodinámica en el Hyperloop proporciona una visión crítica a cerca de como las diferencias en el diseño del túnel afectan al rendimiento global del sistema, por este motivo, analizar los valores obtenidos de “Drag” supone un procedimiento de gran importancia.

Resistencia a 125 $\frac{m}{s}$			
	BR1	BR2	BR3
Drag [N]	498.735	96.938	65.490
C_D [-]	1.291	0.229	0.154

Tabla 3-5: Valores Resistencia a 125 m/s

En el primer caso, se puede identificar una alta resistencia aerodinámica, debida principalmente a la cercanía entre las paredes del túnel con el vehículo a tratar, lo que provoca una interacción de flujo con dinámicas complejas. Como bien se ha tratado, esta configuración provoca un aumento un aumento de presión en la zona frontal debido a la zona de gran estancamiento, donde la velocidad del aire se reduce de forma drástica. Además, la estela presente en la parte posterior de la cápsula tiene un carácter muy pronunciado debido a la gran diferencia de presiones generada, lo que provoca turbulencias, recirculaciones y vórtices que contribuyen a incrementar el valor de la resistencia

Por otra parte, como se puede observar, existe una reducción drástica en la resistencia aerodinámica para los casos con ratio de bloqueo 2 y 3, lo que se debe a un flujo de aire que viaja más libremente gracias al espacio aumentado alrededor de la cápsula. Esto disminuye la formación de ondas de alta presión, permitiendo una transición de aire más suave alrededor y detrás de la cápsula. Al reducir de forma significativa las interacciones disruptivas del flujo de aire, los valores de Drag y coeficiente de Drag adoptan valores mucho menores que para la configuración con menor diámetro de tubo. En especial, se puede considerar que en BR3 el flujo es prácticamente ideal al presentar los valores de resistencia más pequeños lo que sugiere mínimas perturbaciones y una gran capacidad de recuperación tanto para velocidad como presión al atravesar el vehículo.

3.2.2 ANÁLISIS CASO VELOCIDAD BAJA (100 m/s)

A la hora de proceder con el desarrollo de sistemas de transporte avanzados como es, en este caso, el Hyperloop, es de crucial relevancia entender como varía la funcionabilidad del sistema para diferentes espectros de velocidad. Esto es así ya que a pesar de que se tome la suposición de una velocidad constante, en el caso real la dinámica del sistema cambia por instantes, por lo que conocer cómo influye la variación de velocidad en factores críticos es esencial para garantizar medidas de seguridad, eficiencia y viabilidad en diferentes escenarios operativos. Por este motivo, el estudio a realizar a continuación supone una velocidad de entrada de 100 m/s.

3.2.2.1 Número de Mach

Al analizar el número de Mach para una velocidad menor que en el caso anterior, es esencial prestar especial atención a cómo afectan las condiciones de operación a la aerodinámica del sistema, particularmente los aspectos relacionados con la cinética del flujo y su turbulencia. Por este mismo motivo, se comenzará dando una explicación de cómo actúa el flujo en el caso de ratio de bloqueo 1:

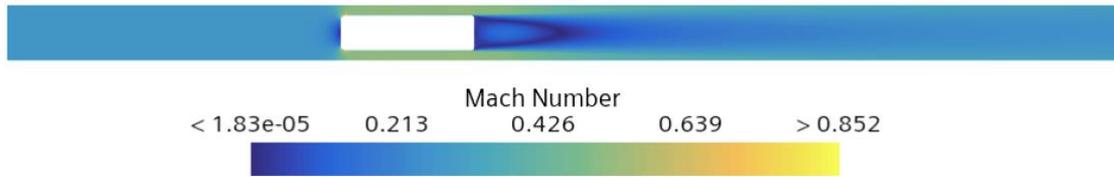


Ilustración 3-12: Evolución Número Mach (BR1/100)

Un apunte importante que realizar es que, al reducir la velocidad de entrada del flujo, la energía cinética presente es considerablemente menor que para el caso de 125 m/s. Esto conlleva un estancamiento en la zona frontal de la cápsula de menor pronunciación, ya que, pese a que la velocidad se sigue reduciendo a prácticamente cero, el gradiente que sufre el aire es de una intensidad mucho menor que para velocidades más altas. A medida que el flujo se ve forzado a rodear los contornos de la cápsula, se sigue produciendo una aceleración, pero de forma menos drástica, ya que se ha producido una reducción en la energía disponible para comprimir y acelerar el aire. Para poner en situación, los picos en este caso alcanzan Mach inferiores a aproximadamente 0.52 mientras que en el caso anterior (125 m/s) se dispara a 0.7. Este suceso reduce la formación de flujo turbulento en la zona posterior al vehículo, ya que, pese a que la zona de recirculación siga manteniendo una magnitud e intensidad considerables, se reduce el estrés aerodinámico sobre la estructura del transporte, mejorando la estabilidad del flujo gracias a que la estela que se forma detrás de la cápsula es significativamente menos intensa y más corta. Debido a que la capacidad de recuperar el estado inicial del sistema es mayor en este caso, se permite una minimización en la generación de vórtices, lo que suponía una de las causas principales en el aumento de resistencia aerodinámica para velocidades altas de entrada.

A continuación, se presentan las simulaciones correspondientes a los otros 2 casos de estudio:

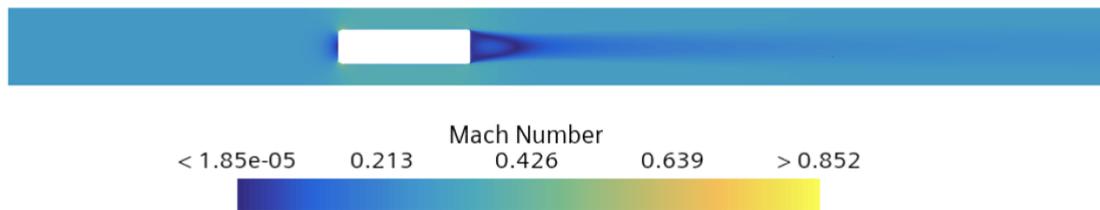


Ilustración 3-13: Evolución Número Mach (BR2/100)

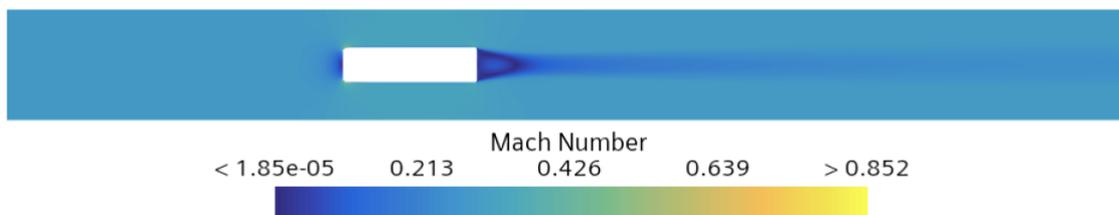


Ilustración 3-14: Evolución Número Mach (BR3/100)

El análisis de estas dos configuraciones resulta de fácil realización ya que se considera análogo al hecho para el caso de 125 m/s. Como se puede observar de forma genérica, es sencillo identificar como el mayor diámetro de túnel permite un flujo de aire más libre y menos restrictivo, lo que se observa en la reducción de gradientes de velocidad incluso mayor que para el caso de mayor velocidad de entrada. La aceleración del flujo que se produce es de apenas +0.09 Mach y +0.04 Mach (para BR2 y BR3 respectivamente), lo que significa una compresión de aire menos intensa permitiendo un recorrido del aire de manera más uniforme. No obstante, y como se ha comentado previamente, la zona de recirculación sufre de una intensidad notable

de todos modos, factor que viene dado por el cambio abrupto de geometría que sufre el trayecto del flujo. Tras esta, si cabe destacar que la estela se vuelve menos pronunciada, sobre todo en el caso de mayor diámetro, aportando una reducción en la perturbación del flujo y la mejora en recuperación de estado inicial. Esto son indicativos de una mejora en la gestión del flujo por parte del sistema.

3.2.2.2 Velocidad Inducida

En el estudio que se pretende realizar a continuación, se profundiza en como las velocidades de entrada se ven modificadas para las diferentes velocidades de la pared y los ratio de bloqueo. De este modo se busca realizar un análisis en el que se compare los resultados con aquellos de velocidad 125 m/s, para así poder obtener una visión ide los efectos que se producen.

Valores Corrección ($V_{wall} = 100 \frac{m}{s}$)	
(BR1) $\rightarrow V_{inlet} \left[\frac{m}{s} \right]$	95.284
(BR2) $\rightarrow V_{inlet} \left[\frac{m}{s} \right]$	99.482
(BR3) $\rightarrow V_{inlet} \left[\frac{m}{s} \right]$	99.828

Tabla 3-6: Valores Corrección Velocidad Inducida a 100 m/s

En primer lugar, para el mayor ratio de bloqueo se tiene una velocidad de entrada de 95.284 m/s, lo que supone una disminución del 4.716% con respecto a la velocidad teórica de la pared. Esto viene provocado por la cercanía a la pared, ya que se producen ondas de presión que tienen que ser contrarrestadas por la energía cinética, efecto que es mayor para el caso de 125 m/s. En esta configuración, pese a que la diferencia de velocidad es del 7.439%, se demuestra que ambos casos son capaces de contrarrestar los efectos ondulatorios, necesitando una menor intervención por parte de la energía el caso de velocidad más reducida.

En segundo lugar, para el ratio de bloqueo medio, la velocidad de entrada es de 99.482 m/s, mostrando una reducción del 0.518%. Este valor es mucho menor que el obtenido para el caso con el diámetro de túnel correspondiente a BR1, lo que muestra una gestión del flujo mejorada, permitiendo una disipación más efectiva de las ondas de presión, acercándose, en gran medida, a la velocidad nominal de la pared. El porcentaje de diferencia para las condiciones operativas de 125 m/s es de 0.754%, lo que no supone una gran disparidad al valor obtenido para una velocidad más baja. Esto induce el pensamiento que a medida que se aumenta el diámetro de túnel, los efectos provocados por una modificación en la velocidad son menores. Incluso, este hecho se podría ver corroborado por las diferencias de velocidad para el caso con menor ratio de bloqueo (BR3), en el cual para 100 m/s la diferencia en la velocidad de entrada es de apenas 0.172% mientras que para 125 m/s únicamente se incrementa al 0.254% de disparidad.

3.2.2.3 Presión Absoluta

Tal y como se ha realizado en el estudio anterior, proceder con una correcta evaluación de la presión para diferentes configuraciones operativas es crucial para poder comprender como afecta a la eficiencia y fuerzas resistivas del sistema la disminución de la velocidad de entrada.

Para ello, se comenzará analizando la distribución de presiones para el caso con menor diámetro de conducto.

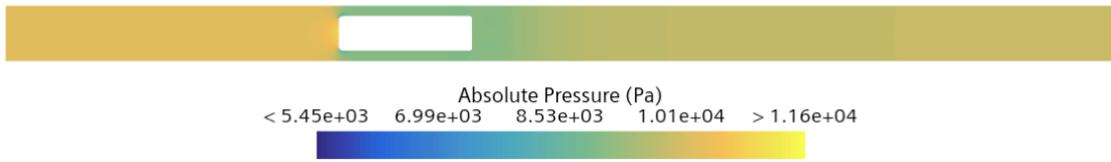


Ilustración 3-15: Evolución Presión Absoluta (BR1/100)

Al igual que para el caso análogo con una velocidad mayor, la interacción del aire con la sección plana frontal de la cápsula genera un notable efecto de estancamiento, no obstante, este aumento de presión es considerablemente menor que para las condiciones con una velocidad de 125 m/s. Esto se atribuye a una menor energía cinética del flujo, lo que reduce la intensidad del choque y, por lo tanto, la compresión de aire que se genera alrededor de la cápsula. No obstante, el salto de presiones sigue siendo notable, por lo que la presión inicial no llega a poder recuperarse en la zona posterior a la cápsula y se sigue manteniendo una zona de estela donde el flujo turbulento y los vórtices siguen afectando a la eficiencia del sistema. El salto de presión es que se percibe para estas condiciones operativas es de:

Salto de Presión BR1 a 100 $\frac{m}{s}$ ($\Delta P_{BR1/100}$) [Pa]
4.056e + 02

Tabla 3-7: Valores Salto Presión (BR1/100)

Esto supone una reducción del 49.3% con respecto al caso base.

En cuanto a los casos con menor ratio de bloqueo, se observan las siguientes distribuciones:

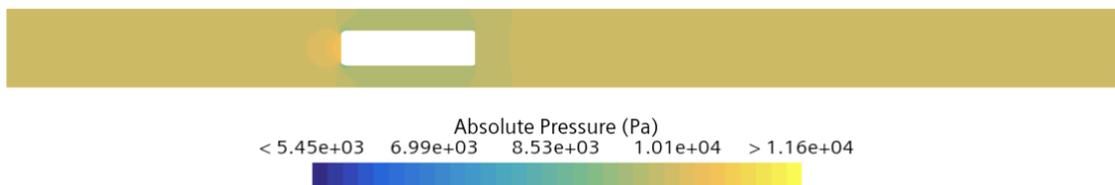


Ilustración 3-16: Evolución Presión Absoluta (BR2/100)

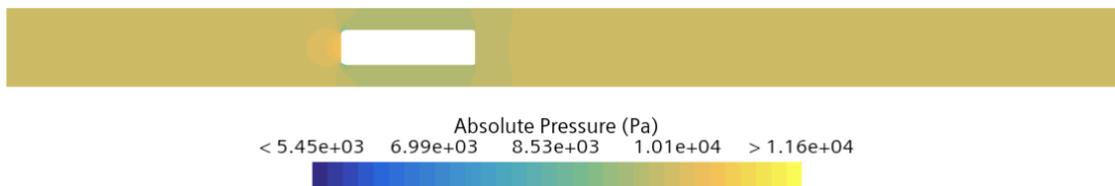


Ilustración 3-17: Evolución Presión Absoluta (BR3/100)

Al disminuir el ratio de bloqueo, el espacio aumentado entre la cápsula y las paredes del conducto permiten que la compresión de aire sea de carácter muy liviano en ambos casos, permitiendo una adaptación de una gran fluidez del flujo alrededor de la cápsula. Como resultado, la estabilización del flujo tras superar el obstáculo del vehículo es casi inmediato, lo que se traduce en una gran tendencia del flujo a un carácter laminar, minimizando la presencia de regiones turbulentas que puedan causar desestabilizaciones en el sistema.

Comparativamente, los saltos de presiones para estos dos últimos casos son los siguientes:

Salto de Presión a $100 \frac{m}{s}$	
BR2 ($\Delta P_{BR2/100}$) [Pa]	4.459e + 01 (44.9% menor que para $125 \frac{m}{s}$)
BR3 ($\Delta P_{BR3/100}$) [Pa]	1.468e + 01 (45.7% menor que para $125 \frac{m}{s}$)

Tabla 3-8: Valores Salto Presión (BR2, BR3/125)

Esto confirma que, para menores velocidades de entrada, el sistema experimenta menos efectos adversos, lo que puede comprender implicaciones significativas en el rendimiento y eficiencia del sistema.

3.2.2.4 Resistencia Aerodinámica

El estudio de la resistencia aerodinámica en un sistema Hyperloop para diferentes velocidades, revela como el diseño y las condiciones del túnel afectan al rendimiento del sistema, un factor de crucial importancia a la hora de desarrollar un medio de transporte que requiere de tanta optimización como es el que ocupa este trabajo. Para analizar de una forma coherente y concisa, se presentarán los diferentes casos junto con los valores de Drag que presentan.

Resistencia a $100 \frac{m}{s}$ (*Reducciones con respecto a $125 m/s$ *)			
	BR1	BR2	BR3
Drag [N]	267.861 (Reducción del 46.3%)	57.000 (Reducción del 41.2%)	38.118 (Reducción del 41.8%)
C_D [-]	1.048 (Reducción del 18.8%)	0.209 (Reducción del 8.3%)	0.139 (Reducción del 9.1%)

Tabla 3-9: Resistencia a $125 m/s$

Para el caso con ratio de bloqueo alto, se puede observar que pese a que persisten efectos similares de estancamiento y turbulencias de estela que para el caso de $125 m/s$, la reducción en energía cinética permite resultar en un menor Drag, siendo aproximadamente la mitad que para la configuración con velocidad de entrada más alta. Esto viene dado gracias a la reducción en los efectos de compresión de flujo que se dan alrededor de la cápsula, lo que permite que el salto de presiones sea considerablemente menor, y por lo tanto, reducir la resistencia aerodinámica. Esto evidencia cómo la disminución de la velocidad influye directamente en la intensidad de las turbulencias y la formación de estelas.

Para los casos de BR2 y BR3, se puede observar una reducción drástica en la resistencia aerodinámica al establecer una velocidad de entrada en el túnel de $100 m/s$. Como ya se ha comentado en las secciones previas, el mayor espacio disponible en las inmediaciones del vehículo facilita el movimiento de un flujo más libre y homogéneo, lo que viene dado por la minimización de efectos disruptivos causados, sobre todo, por las etapas de compresión y expansión. Esto refleja un flujo casi ideal para el caso de tubo más amplio, donde las perturbaciones son mínimas, provocando unos valores de Drag y coeficiente de Drag prácticamente despreciables si se compara de forma relativa con el resto de las condiciones operativas consideradas. En este caso, se vuelve a evidenciar como la reducción de velocidad

permite una gestión de la cantidad de movimiento del flujo de una manera más eficiente, causando la reducción a la mitad en términos de resistencia para los casos que se tratan.

3.2.3 ANÁLISIS CASO VELOCIDAD ALTA (150 m/s)

La próxima fase de este análisis se basa en abordar el estudio correspondiente a una velocidad de entrada e 150 m/s. Al considerarse este un aumento considerable en la velocidad, se plantea un escenario en el que evaluar las posibles dinámicas de flujo y fenómenos aerodinámicos de carácter más extremo que puedan aparecer. Mediante este estudio se pretende comprender las limitaciones y desafíos operativos que pueda llegar a presentar el sistema Hyperloop para así poder establecer un marco de funcionamiento seguro y eficiente para este sistema de transporte.

Para este estudio, es crucial considerar como el diámetro del túnel influye directamente en el comportamiento de la simulación. Esta relación se ve acentuada por el considerable incremento en la velocidad de entrada, ya que el espacio disponible dentro del conducto dictamina como actúa la confluencia de cantidad de movimiento y si, en todo caso, es posible mantener esta teoría o si por el contrario aparecen fenómenos adversos que afecten a la integridad del sistema. Por este motivo, el análisis a realizar a continuación se basará en una subdivisión del comportamiento a través del ratio de bloqueo, a diferencia de los casos anteriores.

3.2.3.1 Caso Ratio de Bloqueo 1

A continuación, se presenta la simulación referente a la evolución del Número de Mach para el ratio de bloqueo más grande:



Ilustración 3-18: Evolución Número Mach (BRI/150)

Tal y como se puede observar en el gráfico de velocidades, el túnel llega a alcanzar velocidades supersónicas, es decir, con valores mayores a Mach 1. De forma preliminar, este suceso concurre en la aparición del fenómeno conocido como bloqueo sónico [27]. Esto se produce en conductos en los cuales se llega a velocidades iguales o superiores a la del sonido, lo que conlleva que el flujo alcance un punto de flujo másico máximo, impidiendo superarlo. Como consecuencia, se forman discontinuidades en el flujo de aire que comprometen en gran medida la predictibilidad del sistema, lo que dificulta realizar mediciones precisas y analizar de forma óptima la adaptación del conducto a una velocidad considerablemente alta. No obstante, es de gran interés analizar que ocurre con el flujo dentro del túnel al ocurrir un bloqueo sónico.

Cuando la cápsula viaja a gran velocidad dentro del túnel, la reducción en la sección transversal del mismo provoca una aceleración notable del flujo de aire. Esto puede llevar a velocidades supersónicas, desencadenando lo que se conoce como 'Flujo Estrangulado', resultado de la alta compresión del aire. Al superar este punto, el flujo de aire supersónico encuentra un cambio brusco en la geometría del túnel, lo que origina ondas de choque. Estas ondas actúan como un mecanismo natural para disipar la energía y reducir la velocidad del flujo a niveles subsónicos. Esto supone la provocación de discontinuidades en el chorro de aire, el

cual se caracteriza por una inestabilidad dada por continuos cambios bruscos en propiedades como presión, temperatura y densidad.

El bloqueo sónico, aparte de provocar incrementos divergentes en la resistencia aerodinámica del sistema, exigiendo un gasto de potencia demasiado alto, compromete la integridad estructural y operacional del sistema, lo que exige una gestión adecuada de las vibraciones excesivas que se pueden llegar a ocasionar. Sin embargo, la adaptación del túnel a las condiciones presentes es una tarea que se escapa del alcance del trabajo, por lo que simplemente se clasificará esta simulación como “inviabile”.

3.2.3.2 Caso Ratio de Bloqueo 2

A la hora de analizar el caso correspondiente al ratio de bloqueo 2 con una velocidad de entrada de 150 m/s, se observan los siguientes resultados obtenidos, empezando por la distribución del Número de Mach:

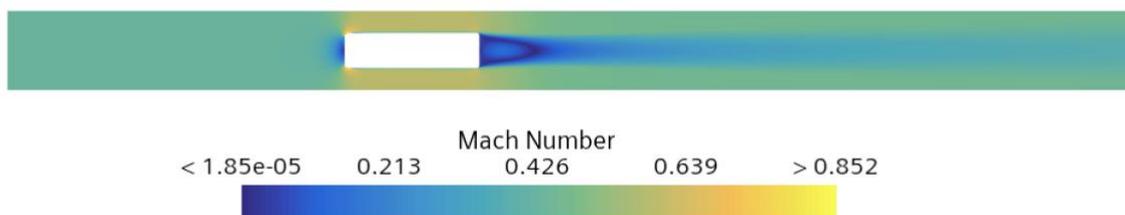


Ilustración 3-19: Evolución Número Mach (BR2/150)

Tal y como se puede identificar, la distribución obtenida es semejante a la de las otras dos configuraciones operativas (100 y 125 m/s), no obstante, estas mostraban un pico de Número de Mach en las proximidades de la cápsula considerablemente menor al del caso actual. Esto provoca la aproximación del flujo a condiciones transónicas, un fenómeno que estaba lejos de ocurrir en la configuración de velocidad base de entrada. Pese a que se halla una aceleración más pronunciada, el sistema presenta altas capacidades para reestablecer las condiciones iniciales de velocidad, aun presentando una zona de recirculación y estela de gran notabilidad. De esta forma se evita la formación de resonancias y vibraciones que puedan desestabilizar el sistema, como si ocurría en el caso con menor diámetro de tubo.

A continuación, se tratará la magnitud de la velocidad inducida presente para este caso operativo:

Valores Corrección ($V_{wall} = 150 \frac{m}{s}$)	
(BR2) $\rightarrow V_{inlet} \left[\frac{m}{s} \right]$	148.225

Tabla 3-10: Valores Corrección Velocidad Inducida (BR2/150)

Al evaluar el impacto de la velocidad inducida para este escenario, sería oportuno establecer paralelismos con los datos adquiridos para las dos velocidades operativas restantes. Mientras que a 100 m/s la pérdida de velocidad es del 0.518% y a 125 m/s del 0.754%, a 150 m/s se observa una caída de velocidad del 1.18%. Este aumento indica que debido a que la velocidad de entrada aumenta, las propiedades turbulentas del flujo forman regiones de mayor presión y vorticidad en los puntos de cambio geométrico repentino. Por lo tanto, la reducción en velocidad efectiva se ve incrementada frente a las otras dos configuraciones ya tratadas.

En siguiente lugar, se analizará la evolución de la presión absoluta en el sistema:

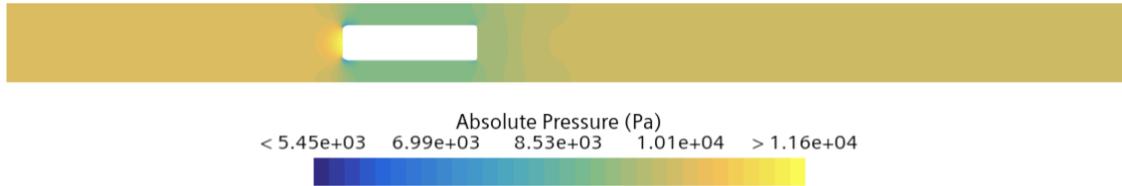


Ilustración 3-20: Evolución Presión Absoluta (BR2/150)

Con la intención de encaminar este estudio de la mejor manera posible, es pertinente mostrar el salto de presión para estas condiciones en comparación con los casos a velocidad de entrada más baja:

Salto de Presión BR2 a $150 \frac{m}{s}$ ($\Delta P_{BR2/150}$) [Pa]
<p style="text-align: center;">1.526e + 02 (88.3% mayor que para $125 \frac{m}{s}$) (242.55% mayor que para $100 \frac{m}{s}$)</p>

Tabla 3-11: Valores Salto Presión (BR2/150)

Como se puede identificar, se sufre un aumento en el salto de presión de forma exagerada, lo que señala, debido al incremento de velocidad, un manejo de carácter mucho más intenso de las fuerzas de compresión. Al analizar la distribución a través de la imagen aportada, se puede identificar como el efecto de estancamiento en la parte frontal de la cápsula se intensifica drásticamente, lo que provoca, asimismo, un aumento en la presión presente alrededor de la cápsula. Pese a este efecto de compresión y la extensión de las regiones turbulentas tras la cápsula, que aumentan en severidad, el flujo intenta recuperar su condición de presión inicial, lo que demuestra estabilidad del sistema, aunque menor que para condiciones de velocidad menores.

Por último, es crucial como comprender como afecta la resistencia aerodinámica a esta simulación. Para ello, se presentan los siguientes datos:

Resistencia BR2 a $150 \frac{m}{s}$	
Drag [N]	167.286
C_D [-]	0.275

Tabla 3-12: Valores Resistencia (BR2/150)

Los valores obtenidos para la resistencia, en comparación con las condiciones de velocidad reducida, supone una diferencia del 193.3% de Drag con el caso de 100 m/s y del 72.5% para la velocidad de 125%. En el caso del coeficiente de Drag, este incremento es del 31.6% (100 m/s) y 20.1% /125 m/s).

Una vez vista la comparativa numérica, es fácil evidenciar como medida que se aumenta la velocidad, también lo hace la resistencia, dado que son directamente proporcionales. Los fenómenos que exacerban este incremento se basan en el estancamiento de la zona frontal, ya que genera mayores diferencias de presión con la parte trasera, y la intensificación de las regiones turbulentas posteriores. Este incremento drástico del drag también puede tener razón

de ser en el acercamiento a condiciones transónicas, lo que aumenta la posibilidad de generar ondas de choque, las cuales, aunque no lleguen a aparecer, pueden tener efectos preliminares.

3.2.3.3 Caso Ratio de Bloqueo 3

Con respecto al último caso, la siguiente imagen muestra el comportamiento del sistema frente a la entrada del flujo con una velocidad de 150 m/s:

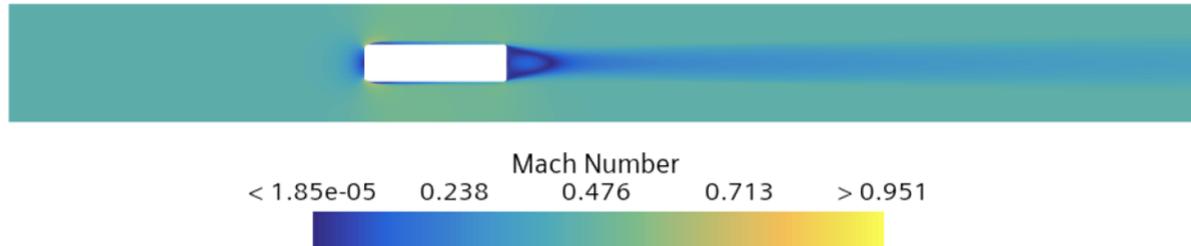


Ilustración 3-21: Evolución Número Mach (BR3/150) Estático

En el análisis de la configuración a tratar, se puede denotar una clara separación del flujo alrededor de la cápsula, evidenciándose en los rebordes del vehículo, donde el flujo sufre una aceleración debido a la reducción de área transversal. Esta separación es un fenómeno de carácter crítico y que requiere de una investigación más detallada dado que afecta de gran manera al estudio del sistema. Los factores físicos y dinámicos que lo ocasionan son los siguientes:

- **Velocidad de Flujo y Geometría de Túnel:** Al reducir el ratio de bloqueo, el diámetro del conducto se ve aumentado, lo que afecta en gran manera en cómo el aire interactúa con la cápsula. El espacio adicional que se genera entre el vehículo y las paredes superior e inferior reduce la efectividad de la cápsula para dirigir el flujo, lo que provoca que se despegue de la superficie en lugar de adherirse a ella, como si ocurría en el resto de los casos tratados.
- **Separación Capa Límite:** Debido al incremento de velocidad y diámetro de túnel, se puede producir una separación prematura del flujo. Esto viene dado ya que el flujo en la pared del vehículo debe pasar de una velocidad de 0 a la de velocidad libre, por este motivo, si se expande la geometría del conducto, se pueden desarrollar inestabilidades. De esta forma el flujo se deadhiere antes de llegar a la velocidad nominal y provocar una separación de la capa límite adelantada, pero, de menor intensidad.
- **Cambios en las Fuerzas de Presión:** Al aumentar el diámetro, la compresión que se realiza no tiene un carácter tan acentuado como para otras geometrías, por lo que esto, junto con la velocidad aumentada del flujo, puede provocar que las zonas de alta presión no sean lo suficientemente fuertes como para impulsar el flujo hacia las paredes de la cápsula, facilitando por lo tanto su separación.

Una vez analizadas las causas de este fenómeno, habría que visualizar como proceder al estudio de este caso. La separación del flujo es un suceso intrínsecamente no lineal y que, por lo tanto, supone que la dinámica del flujo es variante con el tiempo, lo que no se puede estudiar de forma correcta a través de un enfoque estático. Por este motivo, y para poder capturar la evolución temporal de la zona correspondiente a la capa límite, se demanda un análisis transitorio.

Para esta simulación se ha establecido un time step de 5.0×10^{-5} segundos, basándose en un estudio de independencia de paso temporal realizado en el trabajo publicado por J. Galindo, R. Navarro y L. García-Cuevas, B. Pallás, titulado "Development of cost-effective CFD modeling techniques for transient missions of hyperloop vehicles". De esta forma, se pueda asegurar una gran precisión temporal en la respuesta, para así poder capturar con detalle la evolución dinámica del flujo y sus posibles transiciones que aparezcan. Además, en configuraciones transitorias puede ocurrir que el extremo del túnel influya de manera artificial al comportamiento del flujo, haciendo que este "rebote" en la pared y modifique el recorrido del flujo entrante. Por este motivo, se han impuesto condiciones de contorno no reflexivas, extendiendo la longitud total del conducto con la intención que la corriente de aire se desarrolle de forma natural, sin las posibles interrupciones que pueda causar el límite físico del sistema. Bajo estas características, se requirió un tiempo de simulación de 0.967 segundos, espacio temporal requerido para estabilizar de forma completa la solución y que el sistema superase todas las complejidades que supone un sistema de estudio transitorio.

A continuación, se procederá con el análisis de los parámetros de estudio que se han establecido a lo largo del trabajo. Para ello, en primer lugar, se hará uso de las siguientes evoluciones que representa el comportamiento del flujo.



Ilustración 3-22: Evolución Número Mach (BR3/150) Transitorio

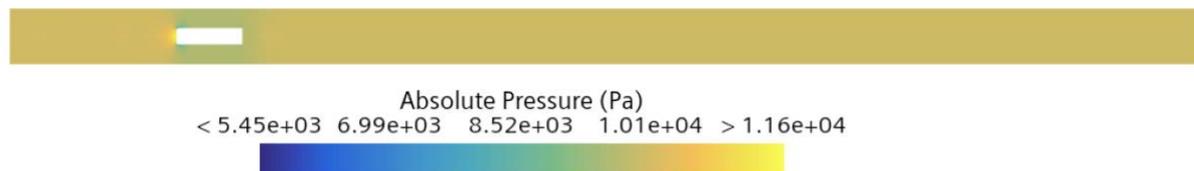


Ilustración 3-23: Evolución Presión Absoluta (BR3/150) Transitorio

Como se puede observar, el número de Mach y la presión absoluta evolucionan de forma similar a como lo hace el flujo en el caso de 125 m/s, alcanzando valores pico similares y demostrando una efectiva estabilización de la corriente de aire, lo que conlleva una convergencia en las características del flujo para esta configuración.

No obstante, a la hora de analizar este caso en el que la velocidad se ve aumentada, se destaca particularmente el salto de presión y la resistencia aerodinámica experimentadas. Los valores obtenidos para estos parámetros de rendimiento son los siguientes:

Salto de Presión BR3 a $150 \frac{m}{s}$ ($\Delta P_{BR3/150}$) [Pa]	
7.066e + 01	
Resistencia BR3 a $150 \frac{m}{s}$	
Drag [N]	147.888
C_D [-]	0.241

Tabla 3-13: Valores Salto de Presión y Resistencia (BR3/150)

Primeramente, este aumento considerable en el salto de presión indica una mayor influencia de la aceleración y desaceleración del flujo en el túnel debido a la mayor velocidad de operación, ya que se ha registrado un incremento del 161% en comparación con el caso de 125 m/s, lo que supone un incremento de carácter muy acentuado. Por otra parte, se observa un aumento de 126% en el valor del drag y un incremento del 57% en el coeficiente de drag, lo que subraya cómo las mayores velocidades intensifican de manera extraordinaria las fuerzas resistivas que actúan sobre la cápsula, reflejando un desafío aerodinámico más significativo bajo condiciones de mayor velocidad operativa.

Previo a comenzar con las conclusiones extraídas del trabajo, se propone presentar una tabla con los valores correspondientes al salto de presión y resistencia de todos los casos tratados, de forma que la comparación final se pueda hacer de una manera más sintetizada:

	<u>BR1 – 0.3844</u>	<u>BR2 – 0.1922</u>	<u>BR3 – 0.0961</u>
Valores ($V_{wall} = 100 \frac{m}{s}$)			
ΔP [Pa]	405.565	44.591	14.675
$Drag$ [N]	267.861	57.000	38.118
C_D [-]	1.048	0.209	0.139
Valores ($V_{wall} = 125 \frac{m}{s}$)			
ΔP [Pa]	799.794	81.056	27.046
$Drag$ [N]	498.735	96.938	65.490
C_D [-]	1.29	0.229	0.154
Valores ($V_{wall} = 150 \frac{m}{s}$)			
ΔP [Pa]	–	152.597	70.666
$Drag$ [N]	–	167.286	147.888
C_D [-]	–	0.275	0.241

Tabla 3-14: Resultados de cada Sistema de Estudio

Los resultados presentados en esta tabla también se pueden escenificar de forma gráfica, facilitando una comparación de carácter más visible:

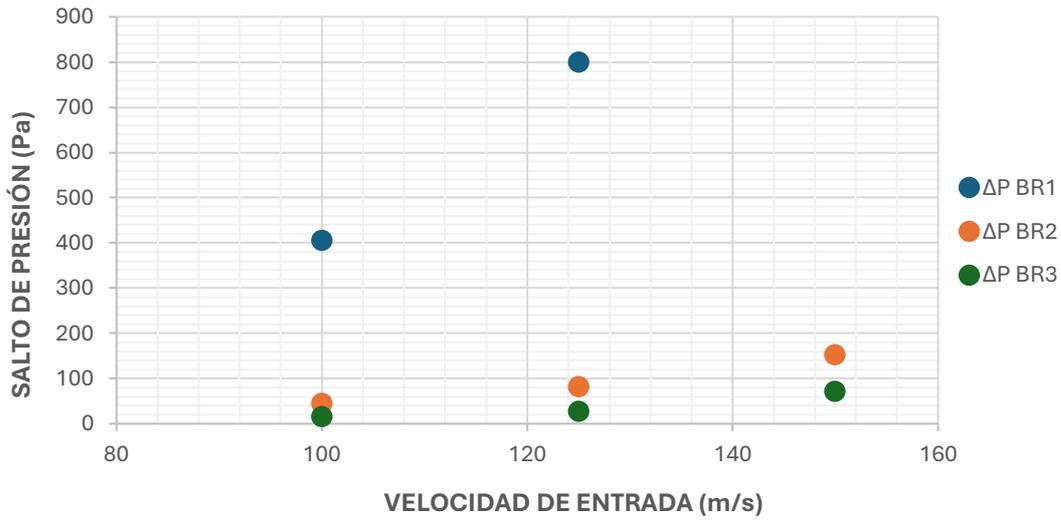


Ilustración 3-24: Gráfico Salto Presión vs Velocidad Entrada

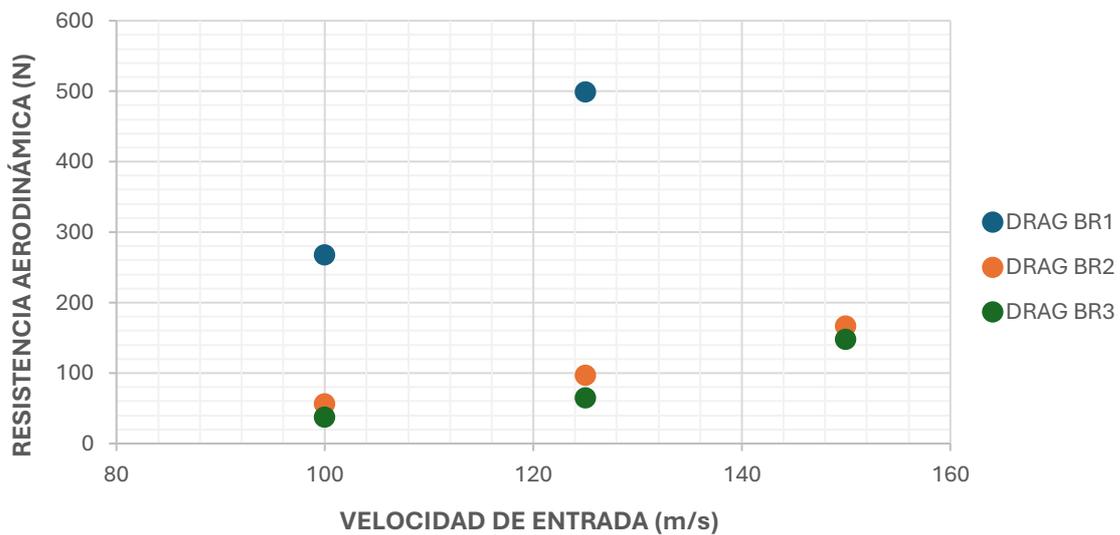


Ilustración 3-25: Gráfico Drag vs Velocidad Entrada



Ilustración 3-26: Gráfico CD vs Velocidad Entrada

Analizando estas 3 gráficas, se puede observar, como ya se ha comentado en varias ocasiones previamente, que el salto de presiones y la resistencia aerodinámica varían de forma significativa con la velocidad de entrada y el blockage ratio. No obstante, al haber graficado estos resultados, es más intuitivo poder obtener unas conclusiones más concretas a cerca del comportamiento del Hyperloop:

En primer lugar, se identifica sencillamente como al incrementar el diámetro del conducto, tanto el salto de presiones como el drag se ven disminuidos, sin embargo, hay que recalcar como esta diferencia es mucho más pronunciada entre BR1 y BR2 que entre BR2 y BR3, lo que podría implicar que pequeños incrementos en el diámetro del túnel más allá de cierto punto tienen un impacto reducido en la reducción del salto de presión.

En segundo lugar, se puede identificar como, en el caso de BR1, el incremento de velocidad de entrada resulta en un incremento de carácter pronunciado en el valor del salto de presiones y resistencia aerodinámica. Para el caso de BR2 y BR3, las variaciones en el valor de los parámetros de estudio son más moderadas. Esto indica que el aumento de velocidad de entrada tiene un impacto significativamente menor para BR2 y BR3 que para BR1, lo que indica que la configuración con un mayor ratio de bloqueo es más sensible a los cambios operativos del flujo.

Por último, sería también de gran interés estudiar de manera gráfica como afecta la velocidad inducida a cada configuración del sistema:

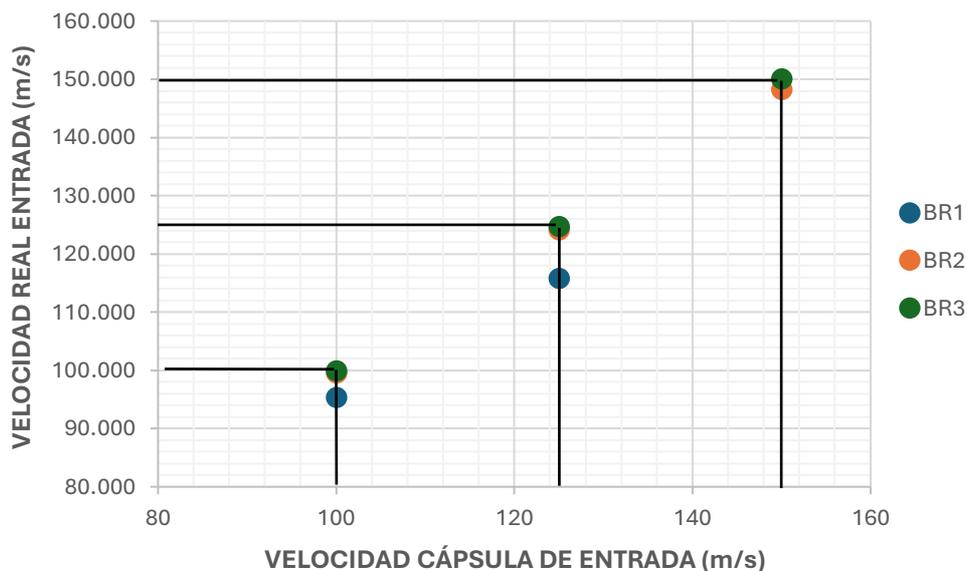


Ilustración 3-27: Velocidad Entrada Teórica vs Real

Como se puede observar, en el caso de las diferencias entre la velocidad real y la de la cápsula (afectada por la velocidad inducida), los ratios de bloqueo no desencadenan una diferencia tan importante como si lo era en el caso de parámetros como la presión o la velocidad. Pese a que las diferencias entre BR1 y BR2 siguen siendo mayores que entre BR2 y BR3, los efectos de esto son de un grado bajo.

4. CONCLUSIONES

Tras haber realizado un análisis completo y comparativo de los resultados obtenidos mediante simulaciones a través de la dinámica de fluidos computacional (CFD), se puede presentar entonces las conclusiones extraídas de este estudio. Para ello, se usará de base los objetivos establecidos al principio del trabajo, de forma que las conclusiones obtenidas se alineen con estos propósitos y finalidades.

4.1 COMPARATIVA DE CONDICIONES ABIERTAS Y CERRADAS

Como bien se ha establecido en todo momento, el objetivo principal de este análisis ha sido comparar de forma detallada el rendimiento del sistema Hyperloop bajo condiciones abiertas y cerradas. A través de este estudio, se ha buscado identificar y cuantificar no solo las diferencias, sino también los puntos de convergencia, si es que los hay.

En primer lugar, el ratio de bloqueo más alto (BR1), presenta un comportamiento del flujo de carácter crítico, ya que el número de Mach alcanzaba valores de extrema magnitud en la zona frontal de estancamiento, pudiendo incluso superar la velocidad del sonido atmosférica. Como consecuencia, para las 3 velocidades de uso se han producido significativos picos de presión absoluta que se reflejaron en los valores más altos en términos de salto de presión, haciendo medir altas resistencias aerodinámicas. En concreto, para una velocidad de 150 m/s, el sistema ha mostrado un compromiso en cuanto a estabilidad y eficacia ya que se ha llegado al bloqueo sónico, lo que impide conseguir una de las premisas iniciales del Hyperloop, como son las altas velocidades. Por el contrario, al reducir el ratio de bloqueo sistemáticamente, en todo el espectro de velocidades se ha podido registrar una reducción en los picos de presión y un comportamiento más estable del número de Mach, siendo muy semejantes los resultados obtenidos para los casos de ratio de bloqueo 2 y 3, lo que conlleva la siguiente comparativa entre condiciones abiertas y cerradas:

- **Condiciones Cerradas:** En estos escenarios, especialmente a altos ratios de bloqueo, las condiciones operativas han demostrado una intensificación de los desafíos aerodinámicos que se presentan. Los fenómenos de compresión y expansión de aire han sido más pronunciados bajo estos diámetros de túnel, lo que ha provocado flujos más turbulentos y variaciones de presión mayores. Esto, subraya la necesidad de optimizar el diseño del conducto para poder mitigar estos efectos y mejorar la estabilidad y efectividad del funcionamiento del sistema.
- **Condiciones Abiertas:** Estas configuraciones han permitido un recorrido del flujo de aire de carácter más libre y homogéneo, proporcionando unas características laminares del flujo que han resultado en una reducción considerable de la resistencia aerodinámica frente a los casos de condiciones cerradas, llegando a variaciones del 90%. Esto ha venido dado por la menor formación de vórtices y una recuperación más rápida de la presión en la zona posterior a la cápsula. Al presentar un flujo más estable y menos perturbado, se evidencia la ventaja que supone operar el sistema en un entorno menos confinado, tal y como puede suponer en los casos 2 y 3, entre los cuales no se observan grandes diferencias en el comportamiento del sistema.

Como conclusión para este apartado, se puede revelar como este análisis integral demuestra que la eficiencia del Hyperloop mejor significativamente para condiciones de menor ratio de bloqueo y condiciones más abiertas.

4.2 CONCLUSIÓN INTEGRADA SOBRE VARIACIÓN VELOCIDAD DE ENTRADA E INDUCIDA

Conocer el impacto de la velocidad de entrada y su consecuente velocidad inducida sobre la dinámica y eficiencia del sistema Hyperloop supone un análisis de gran relevancia. Esto se debe a que estas variables suponen una de las características operativas más importantes de este medio de transporte.

4.2.1 IMPACTO VARIACIÓN VELOCIDAD DE ENTRADA

Al analizar la tabla final de resultados ubicada al final del análisis de resultados, se puede dictaminar que la investigación ha demostrado que incrementar la velocidad de entrada desde 100 m/s a 150 m/s supone efectos pronunciados y para tener en cuenta en todas las métricas aerodinámicas que se han tratado. Al incrementar la velocidad, el estancamiento de aire en la zona frontal se intensifica, resultando en un incremento sustancial de la presión frontal y, por ende, en un valor de Drag elevado. Esta relación directa sugiere que el diseño de la cápsula debe optimizarse de forma que se pueda manejar velocidades altas sin comprometer de una forma tan acentuada la estabilidad aerodinámica.

Por otra parte, hay que tener en cuenta los efectos de la variación de velocidad para cada configuración de ratio de bloqueo. Los productos obtenidos del análisis comparativo muestran como los sistemas con diámetro de conducto más alto gestionan de una mejor forma las altas velocidades, ofreciendo características cercanas a las laminares. Por el contrario, en configuraciones con ratio de bloqueo alto y velocidades relativamente altas, se observan transiciones abruptas en el régimen del flujo, lo que puede acarrear fenómenos críticos que comprometan el correcto desempeño del sistema.

4.2.2 EFECTOS VELOCIDAD INDUCIDA

Al entender la velocidad inducida como la velocidad adicional generada por el desplazamiento del vehículo dentro del túnel confinado, este estudio ha podido clarificar como esta variable distorsiona de una forma considerable la rapidez de flujo percibido por el vehículo y, por tanto, métricas de rendimiento, presión y eficiencia. Al evaluar estos efectos en las diferentes configuraciones propuestas, se ha encontrado que la velocidad inducida tiene una influencia más pronunciada en configuraciones de ratio de bloqueo alto debido a la proximidad entre las paredes de la cápsula y el conducto. Mientras, en condiciones estipuladas bajo BR2 y BR3, se logra una gestión más efectiva del flujo, con menores discrepancias entre la velocidad de entrada percibida y la correspondiente a la pared del túnel, lo que facilita una operación más predecible y un análisis de mayor precisión.

Las conclusiones destacan como el rendimiento óptimo y la estabilidad del sistema se alcanzan de mejor manera bajo condiciones de baja velocidad inducida, lo que viene dado por velocidades de entrada reducidas y ratios de bloqueo menores. De esta forma, el flujo se puede manejar de manera más eficiente y segura, debido a que la predictibilidad sobre su comportamiento aumenta.

4.3 ALINEACIÓN CON PRUEBAS REALES

El haber procedido con este estudio revela la necesidad de hallar las áreas de convergencia y divergencia entre condiciones abiertas y cerradas, de forma que se pueda tener una base teórica sobre qué resultados se pueden traducir de las simulaciones CFD a aplicaciones prácticas del Hyperloop y viceversa. De esta forma, se podrá refinar la viabilidad y posibilidad de optimización del sistema en escenarios reales.

Al analizar los resultados, se puede identificar como las condiciones más abiertas son las que proporcionan al flujo una mayor facilidad para su desplazamiento y, por ende, las que deben considerarse a la hora de diseñar el sistema ya que ofrecen una mayor eficiencia operativa y una mínima resistencia aerodinámica. Por otro lado, cabe destacar que los túneles de viento reales únicamente serían capaces de replicar estas condiciones de funcionamiento, ya que los conductos con geometría de mayor confinamiento aún se encuentran en desarrollo. Por este motivo, se puede dictaminar que a través de los estudios en túneles de viento se puede obtener información extraíble y en cierto grado precisa para la aplicación sobre sistemas de vacío de Hyperloop. Esto se puede observar de forma más clara al estipular que las diferencias en los resultados obtenidos para los casos de BR2 y BR3 son mínimas, al contrario que pasa con BR1. Por este motivo, se podría llegar a poder extrapolar resultados obtenidos en el túnel de viento a sistemas en lo que el ratio de bloqueo son similares a los del caso 2 y 3. De hecho, sería adecuado tener en cuenta las diferencias percentiles entre ambas condiciones para poder estipular leyes de aproximación que ayuden a convertir resultados obtenidos en condiciones abiertas a cerradas. Pese a que esto no supone una gran precisión, dado que todavía se está en la etapa de desarrollo del Hyperloop, esta posibilidad de usar, de forma estimada, datos obtenidos en túneles de viento para estimar el comportamiento en condiciones confinadas moderadas supone un gran avance. Es más, la disparidad en los resultados es mucho más pronunciada entre BR1 y BR2 que entre BR2 y BR3, lo que podría implicar que pequeños incrementos en el diámetro del túnel más allá de cierto punto tienen un impacto notable, haciendo que a partir de cierto ratio de bloqueo las condiciones del flujo sean muy semejantes entre escenarios abiertos y cerrados.

Este conocimiento que se pretende extrapolar de pruebas reales debe limitarse únicamente a su aplicación sobre procesos de optimización, de forma que se pueda conseguir unas condiciones operativas y geométricas que a priori puedan maximizar la eficiencia del sistema, pero sin que esto suponga la opción final de diseño. Es decir, la convergencia entre los resultados obtenidos en ambos tipos de estudios proporciona una base sólida para refinar los modelos de simulación y ajustar las predicciones de rendimiento.

5. APORTACIONES CLAVE DEL ESTUDIO

Un importante punto, se trata de comprender como ha contribuido este estudio al entendimiento de los sistemas Hyperloop.

En primer lugar, hay que analizar la profundización que se ha realizado en la sección de **aerodinámica**. Esto se ha podido llevar a cabo a través de la identificación y análisis del comportamiento del sistema bajo variadas condiciones operativas y geométricas. Se ha explorado como el sistema responde frente a diferentes ratios de bloqueo y velocidades de entrada, lo que proporciona información crucial sobre como respondería el sistema frente a un trayecto en el que se puedan ver modificadas las condiciones de operación. Además, este estudio también ha proporcionado relevancia al impacto de la velocidad inducida, un aspecto a menudo subestimado en trabajos previos de la misma índole. De esta forma, se puede mejorar la precisión en la que se realizan las predicciones sobre las respuestas del sistema, proporcionando también una gran base sobre la que poder trabajar para ajustar el diseño y operación para poder mitigar estos efectos inducidos y mejorar la precisión de los resultados.

En segundo lugar, a cerca de la **optimización del túnel y la cápsula**, la investigación realizada ha destacado la importancia que el diseño geométrico del sistema sostiene en la eficiencia del sistema. Los resultados obtenidos sugieren de una forma clara que se podrían conseguir mejoras sustanciales si se presta una mayor atención a proporcionar un diseño aerodinámico a los diferentes componentes. Este incremento del rendimiento y eficiencia reduciría los costes operativos iniciales y continuos del sistema, haciéndolo una opción mucho más atractiva para los diferentes organismos que promueven esta tecnología y así aumentar su viabilidad comercial.

6. PROPUESTAS DE MEJORA Y FUTUROS TRABAJOS

En vista de las conclusiones obtenidas a raíz de este estudio, es fundamental explorar ahora propuestas y posibles futuros trabajos que ayuden a contribuir de forma efectiva al desarrollo del sistema Hyperloop. A continuación, se presentan una serie de recomendaciones y áreas de investigación en las que indagar para poder contribuir de forma significativa en el desarrollo de esta innovadora tecnología:

- **Optimización del Diseño Geométrico:** A lo largo de este trabajo, se ha optado por mantener una geometría para la cápsula constante, únicamente modificando el diámetro del túnel por el que viaja. Por este motivo, una investigación dedicada al desarrollo de diseños aerodinámicos permitiría obtener geometrías que puedan ofrecer significativas mejoras en cuando a reducción de resistencia y mejora general de la eficiencia. Esto, principalmente habría que realizarlo eliminando los cambios abruptos de superficie, de modo que se puedan reducir la magnitud de los principales causantes del Drag, como son la zona frontal de estancamiento y la trasera de recirculación. Además, la modelización de simulaciones CFD con escenarios más complejos permitiría incluso una mayor optimización del sistema, pudiendo determinar todas aquellas zonas que perjudican a la fluidez del flujo.
- **Estudios Dinámicos en Condiciones Extremas:** Relacionando este punto con la propuesta de estudio anterior, cabe destacar que un mejor diseño del sistema permitiría garantizar la operabilidad y seguridad del Hyperloop en una variedad más amplia de condiciones ambientales y operativas. Esto se debe a que, con el estudio actual, es imposible alcanzar altas velocidades tales como 150 m/s sin generarse graves inestabilidades en el flujo, por eso mismo una optimización de la geometría permitiría ayudar a entender y comprender de mejor manera los límites operacionales. Asimismo, se podrían desarrollar soluciones para garantizar máximos niveles de equilibrio y seguridad bajo cualquier condición o circunstancia, tales como las que se derivan de velocidades de entrada cercanas a las supersónicas.
- **Interacción de Múltiples Cápsulas en un Túnel:** Un área que requeriría mayor exploración por parte de investigadores y desarrolladores debería ser las consecuencias que supone la interacción del flujo entre dos cápsulas simultáneas. Como se ha visto, los efectos de estela en este estudio suponen un rasgo fundamental en la continuidad del aire, por eso mismo, sería de interés conocer de forma exacta como influenciaría a una cápsula que el flujo frontal fuese mínimamente turbulento, o, por el contrario, cuanta magnitud espacial habría que dejar entre un vehículo y otro para poder evitar que la estela provocada por una cápsula afecte a la que viaja detrás de ella.
- **Estudios de Impacto Ambiental:** Actualmente, las leyes reguladoras a cerca de la sostenibilidad de los medios de transporte son cada vez más severas. Por este motivo, previo a llevar a cabo grandes proyectos de construcción, habría que continuar explorando el impacto ambiental exacto que supondría el Hyperloop, con la intención de poder obtener una aproximación cada vez más exacta. De la misma forma, los estudios propuestos referentes a la optimización del diseño también



deberían incluir estrategias con las que poder integrar fuentes de energía renovable en los sistemas, lo cual supone un importante rasgo a tener en cuenta.

- **Simulaciones a Escala Completa:** Pese a que puede parecer de una lógica muy clara, aunque las simulaciones en CFD presentan una base sólida de estudio, es de vital importancia continuar con la investigación y desarrollo en este campo para poder realizar pruebas con modelos a escala completa de una forma más reiterada. Así, se podría proceder con un proceso de prueba y mejora continuo, lo que permitirá refinar aún más las características del sistema, tanto estructurales como aerodinámicas. Aunque aún falta un largo período de tiempo hasta que esto sea posible, siempre hay que mantenerlo en el punto de mira, de manera que no se pierda noción de la realidad, algo que puede ocurrir si todos los estudios son meramente teóricos. Además, sería conveniente ir midiendo la funcionalidad del sistema de forma progresiva con cada avance que se fuese consiguiendo.

7. PRESUPUESTO

A continuación, se presenta un desglose exhaustivo de cada elemento del presupuesto:

7.1 COSTES DIRECTOS

DEPRECIACIÓN DEL ORDENADOR

- **MacBook Pro (16 pulgadas, 2019)**
 - **Especificaciones:**
 - **Procesador:** 2.3 GHz Intel Core i9 de 8 núcleos
 - **Gráficos:** Intel UHD Graphics 630 1536 MB
 - **Memoria:** 16 GB 2667 MHz DDR4
 - **Valor de compra:** 2,799 €
 - **Depreciación anual:** 25%
 - **Uso para el proyecto (6 meses):** 25% de 2,799 € = 699.75 €
 - **Coste atribuido al proyecto:** 349.88 € (50% del uso anual, dado que el proyecto dura 6 meses)

LICENCIAS DE SOFTWARE

- **STAR CCM+**
 - **Costo por 20 licencias anuales:** 20,000 €
 - **Costo individual por licencia al mes:** 83.33 €
 - **Costo por 6 meses (2 licencias):** 1,000 €
- **Microsoft Office**
 - **Licencia anual:** 69 €
 - **Uso por 6 meses:** 34.5 €

MANO DE OBRA

- **Ingeniero Junior:**
 - **Tarifa por hora:** 18 €
 - **Horas totales de trabajo:** 600
 - **Costo total de mano de obra:** 10,800 €

- **Ingenieros Senior (Tutores):**
 - **Tarifa por hora:** 28 €
 - **Horas totales de trabajo:** 50 horas x 2 = 100 horas
 - **Costo total de mano de obra:** 2,800 €

7.2 COSTES INDIRECTOS (16% SOBRE COSTES DIRECTOS)

Los costes indirectos incluyen aspectos como electricidad, internet, y uso mobiliario del hogar. Este se puede estimar como el 16% del total del coste directo:

- **Cálculo:** 16% de (349.88 € + 1,034.5 € + 10,800 € + 2,800 €) = 16% de 14,984.38 € = 2,397.5 €

7.3 BENEFICIO

Se supondrá que es un 7% sobre los costes totales antes de IVA:

- **Cálculo:** 7% de (14,984.38 € + 2,397.5 €) = 7% de 17,381.88 € = 1,216.73 €

7.4 IVA

Se aplica un 21% sobre los gastos totales incluido el beneficio:

- **Cálculo:** 21% de (17,381.88 € + 1,216.73 €) = 21% de 18,598.61 € = 3,905.71 €

7.5 PRESUPUESTO FINAL

Desglose del Presupuesto Total:

CONCEPTO	COSTE (€)
Costes Directos	14,984.38
Costes Indirectos	2,397.5
Subtotal	17,381.88
Beneficio	1,216.73
Subtotal + Beneficio	18,598.61
IVA	3,905.71
Total Presupuesto	22,504.32

Tabla 6: Desglose Presupuesto Trabajo

8. ODS

Al tratarse de un mero trabajo académico, las intenciones y contexto en el que se trabaja, si podrían relacionarse de forma indirecta con las ODS.

En primer lugar, el sistema de transporte Hyperloop representa un avance e innovación significativo en la industria del transporte, debido a la capacidad que tendría de impulsar el crecimiento económico y el desarrollo industrial sostenible. Esto es así ya que la propulsión se daría gracias a energía eléctrica, lo que lo hace altamente sostenible, al poder obtenerse mediante la extracción a través de fuentes renovables. Por otra parte, el sistema presenta una gran proyección para ser uno de los agentes principales que contribuyan en disminuir la congestión de tráfico en carretera y aeropuertos, al ofrecer una opción colectiva y rápida.

Por estos motivos, el Hyperloop tiene el potencial de contribuir con varios ODS como: ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), ODS 9 (Industria, innovación e infraestructuras), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y ODS 13 (Acción por el clima).

ODS	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza				X
ODS 2. Hambre cero				X
ODS 3. Salud y bienestar			X	
ODS 4. Educación de calidad				X
ODS 5. Igualdad de género				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante	X			
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles	X			
ODS 12. Producción y consumo responsables				X
ODS 13. Acción por el clima	X			
ODS 14. Vida submarina				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				X
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				X

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wikipedia contributors. (2024c, julio 16). Hyperloop. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop>
- [2] Musk, E. (2013). Hyperloop Alpha. Tesla.
https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf
- [3] Gabriel. (2018, 13 noviembre). ¿Cómo funciona el tren de levitación magnética? | Blog Truecalia. Blog Truecalia.
<https://www.truecalia.com/blog/funciona-tren-levitacion-magnetica/>
- [4] Hodaib, A., & Ibrahim, M. (2016). Conceptional Design of a Hyperloop Capsule with Linear Induction Propulsion System. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/profile/Ahmed-Hodaib/publication/303565135_Conceptional_Design_of_a_Hyperloop_Capsule_with_Linear_Induction_Propulsion_System/links/577c146508ae213761cab8f8/Conceptional-Design-of-a-Hyperloop-Capsule-with-Linear-Induction-Propulsion-System.pdf
- [5] Advantages of a new Hyperloop transport technology. (2017, 1 octubre). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore.
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8109613>
- [6] Mitropoulos, L., Kortsari, A., Koliatos, A., & Ayfantopoulou, G. (2021). The Hyperloop System and Stakeholders: A Review and Future Directions. Sustainability, 13(15), 8430.
<https://doi.org/10.3390/su13158430>
- [7] Wikipedia contributors. (2024a, mayo 28). Hyperloop One. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop_One
- [8] Wikipedia contributors. (2024b, julio 3). Hyperloop Transportation Technologies. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop_Transportation_Technologies#:~:text=Hyperloop%20Transportation%20Technologies%2C%20also%20known,based%20on%20the%20Hyperloop%20concept.&text=Playa%20Vista%2C%20California%2C%20U.S.
- [9] Hodaib, A., & Ibrahim, M. (2016). Conceptional Design of a Hyperloop Capsule with Linear Induction Propulsion System. ResearchGate.
<https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/112/6709/a6709.pdf>
- [10] colaboradores de Wikipedia. (2024, 15 junio). Hyperloop. Wikipedia, la Enciclopedia Libre.
<https://es.wikipedia.org/wiki/Hyperloop>
- [11] More than a pipe dream: Europe's hyperloop ambitions. (2023, 20 diciembre). The Parliament Magazine.
<https://www.theparliamentmagazine.eu/news/article/hyperloop-mobility-climate-change-europe-zeleros-hardt>
- [12] Musk, E. (2013). Hyperloop Alpha. Tesla.
https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf

- [13] Le, T. T. G., Jang, K. S., Lee, K., & Ryu, J. (2020b). Numerical Investigation of Aerodynamic Drag and Pressure Waves in Hyperloop Systems. *Mathematics*, 8(11), 1973.
<https://doi.org/10.3390/math8111973>
- [14] Oh, J., Kang, T., Ham, S., Lee, K., Jang, Y., Ryou, H., & Ryu, J. (2019). Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics of Hyperloop System. *Energies*, 12(3), 518.
<https://doi.org/10.3390/en12030518>
- [15] Lluésma-Rodríguez, F., González, T., & Hoyas, S. (2021). CFD Simulation of a Hyperloop Capsule Inside a Low-Pressure Environment Using an Aerodynamic Compressor as Propulsion and Drag Reduction Method. *Applied Sciences*, 11(9), 3934.
<https://doi.org/10.3390/app11093934>
- [16] Valli, A., & Jankowska, M. (2017). Generalized Regular Quadrilateral Mesh Generation based on Surface Foliation. *ResearchGate*.
https://www.researchgate.net/publication/320497021_Generalized_Regular_Quadrilateral_Mesh_Generation_based_on_Surface_Foliation
- [17] Understanding the Effects of Curvature and Proximity Settings. (2023, 16 febrero). (C) Copyright 2023.
https://help.spaceclaim.com/dsm/6.0/en/Discovery/user_manual/meshing/mesh/r_mesh_effets_curvature_proximity.html
- [18] Segregated vs. Coupled CFD Flow Solvers | Resolved Analytics. (s. f.). Resolved Analytics.
<https://www.resolvedanalytics.com/cfd/coupled-vs-segregated-cfd-flow-solvers>
- [19] Johansson, C. (2024, 29 junio). Coupled Solver Settings in SimCenter STAR-CCM+ - Volupe.com. Volupe.com.
<https://volupe.com/simcenter-star-ccm/coupled-solver-settings-in-simcenter-star-ccm/>
- [20] Sarkar, S., & Sanyal, R. N. (2000). Efficient Simulation of Turbulent Flow Using Coupled Solver Techniques. *CiteSeerX*.
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=ee91727da5e9e2c0101a426daa8b102dcb48165c>
- [21] K-Omega Turbulence Models | Global Settings | SimScale. (2023, 20 julio). SimScale.
<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>
- [22] colaboradores de Wikipedia. (2023, 10 octubre). Ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds. Wikipedia, la Enciclopedia Libre.
https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaciones_de_Navier-Stokes_promediadas_por_Reynolds
- [23] Skill-Lync. (s. f.). Near Wall Treatment and y+ Estimation. Skill-Lync.
<https://skill-lync.com/blogs/technical-blogs/cfd-near-wall-treatment-and-y-estimation>
- [24] Flujo turbulento - Atreydes Ingeniería - Sevilla. (2021, 3 mayo). Atreydes Ingeniería - Sevilla.
<https://atreydes.com/y-turbulencia#:~:text=El%20par%C3%A1metro%20y%2B,-El%20comportamiento%20del&text=Se%20trata%20de%20una%20cantidad,en%20t%C3%A9rminos%20de%20longitudes%20viscosas>
- [25] Pierrot, D. (2010). CFD Analysis of Aerodynamic Flow in Aircraft Design. Ingemeca Aeronautique.



<https://ingemecaeronautique.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/07/report-pierrot1.pdf>

[26] Galindo, J., Navarro, R., García-Cuevas, L., & Pallás, B. (2023). Development of cost-effective CFD modeling techniques for transient missions of hyperloop vehicles. *CMT - Clean Mobility and Thermofluids, Universitat Politècnica de València*. Camino de Vera, 46022 Valencia, Spain.

[27] colaboradores de Wikipedia. (2021, 20 diciembre). Bloqueo sónico. Wikipedia, la Enciclopedia Libre.

https://es.wikipedia.org/wiki/Bloqueo_s%C3%B3nico



10. PLIEGO DE CONDICIONES

Summary Report: NRBC_Predictive_125ms_CONVERGED
1_BRmax_125_9iteration_TEMPERATURA_PRESION

Session Summary

Date 16 jul 2024 14:58:36
Simulation \\Mac\Home\Desktop\TFG\CASOS_STAR\1ITERATION_125\NRBC_Pr
edictive_125ms_CONVERGED
1_BRmax_125_9iteration_TEMPERATURA_PRESION.sim

File size 37 MB

Number of 4
Partitions

Number of 4
Restored
Partitions

Software Summary

Version BuildArch: win64
BuildEnv: clang15.0vc14.2-r8
PresentationVersion: 2310
ReleaseDate: Wed Oct 4 13:05:35 UTC 2023
ReleaseNumber: 18.06.006

MPI MS MPI-10.1.12498.16
Version

Hardware Summary

Hosts Number Processes: 4
Rank[0]: OMARMEIADTH64BC
Rank[1]: OMARMEIADTH64BC
Rank[2]: OMARMEIADTH64BC
Rank[3]: OMARMEIADTH64BC

Simulation Properties

1 NRBC_Predictive_125ms_CO NVERGED 1_BRmax_125_9iteration_TEMPE RATURA_PRESION			
+-1	Continua	Continua	1
	-1 Physics 1	Regions	[Region]
		Interfaces	[]
		Point Sets	[]
		Active	true
		Motion Always Active	false
		Tags	[]



	+-1 Models		
Treatment	+-1 All y+ Wall	Iterative Ustar	false
	+-2 Axisymmetric		
	+-3 Coupled Energy	Enthalpy Formulation	false
		Flow Boundary Diffusion	true
	+-4 Coupled Flow	Integration	IMPLICIT
		Positivity Rate Limit	0.2
		Preconditioning Enabled	true
		Unsteady Low-Mach Preconditioning	true
		Unsteady Preconditioning Max Factor	0.95
		Pressure Difference Scale Factor	2.0
		Minimum Reference Velocity	1.0E-10 m/s
		Maximum Reference Velocity	1000000.0 m/s
		Flow Boundary Diffusion	true
		Secondary Gradients	On
		Coupled Inviscid Flux	Roe FDS
		Discretization	2nd-order
	+-5 Gas		
	-1 Air	Database Material	Air (Air) [Standard/Gases]
		Tags	[]
Properties	-1 Material		
Viscosity	+-1 Dynamic	Method	Sutherland's Law
1	Sutherland's Law	Reference Value	1.716E-5 Pa-s



			Sutherland Constant	111.0 K
			Reference Temperature	273.15 K
Weight		+-2 Molecular	Method	Constant
		-1 Constant	Value	28.9664 kg/kmol
Heat		+-3 Specific	Method	Constant
		-1 Constant	Value	1003.62 J/kg-K
Conductivity		+-4 Thermal	Method	Constant
		-1 Constant	Value	0.0260305 W/m-K
Prandtl Number		-5 Turbulent	Method	Constant
		-1 Constant	Value	0.9
		+-6 Gradients	Boundary Cell	0.06
			Eigenvalues Ratio Tolerance	
			Limit GradVar By Beta	true
			Limiter Method	Venkatakrisnan
			Custom Accuracy Level Selector	2.0
			Maximum Reconstruction Coefficient	1.0
			Two Pass Velocity Gradient	false
			Use TVB Gradient Limiting	false
			Acceptable Field Variation (Factor)	0.05
		+-7 Ideal Gas	Incompressible	false
			Density Limiting	false
Turbulence		+-8 K-Omega		
		+-9 Reynolds-Averaged Navier-Stokes		
Interpolation		+-10 Solution	Per Part Mapping	false



			Interpolation Method	Nearest neighbor
			Legacy Method	false
			Conservation Correction	Disable
		+-11 SST (Menter) K-Omega	Curvature Correction Option	Off
			Realizability Option	Durbin Scale Limiter
			Compressibility Correction	true
			Low Re Damping Modification	false
			Convection	2nd-order
			Normal Stress Term	false
			Tke Minimum	1.0E-10
			Sdr Minimum	1.0E-10
			Secondary Gradients	On
			Kappa	0.41
			BetaStar	0.09
			Beta1	0.075
			Sigma_k1	0.85
			Sigma_w1	0.5
			Beta2	0.0828
			Sigma_k2	1.0
			Sigma_w2	0.856
			Constitutive Option	Linear
			a1	0.31
		+-1 Compressibility Parameters	Zeta_Star	1.5
		`-2 Realizability Coefficient	Realizability Coefficient	0.6
		+-12 Steady	Continuum Iteration	4037
		+-13 Turbulent		

^-14 Wall Distance	Wall Distance Method	Implicit Tree
+-2 Reference Values		
+-1 Reference Pressure	Value	0.0 Pa
+-2 Minimum Allowable Wall Distance	Value	1.0E-6 m
+-3 Maximum Allowable Absolute Pressure	Value	1.0E8 Pa
+-4 Minimum Allowable Temperature	Value	1.0 K
+-5 Minimum Allowable Absolute Pressure	Value	1.0 Pa
^-6 Maximum Allowable Temperature	Value	50000.0 K
^-3 Initial Conditions		
+-1 Pressure	Method	Constant
^-1 Constant	Value	10000.0 Pa
+-2 Static Temperature	Method	Constant
^-1 Constant	Value	300.0 K
+-3 Turbulence Intensity	Method	Constant
^-1 Constant	Value	0.05
+-4 Turbulence Specification	Method	Intensity + Viscosity Ratio
+-5 Turbulent Velocity Scale	Method	Constant
^-1 Constant	Value	1.0 m/s
+-6 Turbulent Viscosity Ratio	Method	Constant
^-1 Constant	Value	10.0
^-7 Velocity	Method	Constant
	Coordinate System	Laboratory
^-1 Constant	Value	[0.0, 0.0] m/s
+-2 Regions	Part Selection Priority	[Region]
	Regions	1
^-1 Region	Index	1
	Allow Per-Part Values	false
	Physics Continuum	[Physics 1]
	Parts	[Domain]
	Type	Fluid Region
	Topology	VOLUME
	Tags	[]
+-1 Boundaries	Part Surface Selection Priority	[Region: Domain.Axis, Region: Domain.Inlet, Region: Domain.Wall, Region: Domain.Outlet, Region: Domain.Compressor, Region: Domain.Wall Pod, Region: Domain.Nozzle]
	Boundaries	7
+-1 Domain.Axis	Index	12



			Interfaces	
			Part Surfaces	[Domain.Axis]
			Type	Axis
			Allow Per-Surface Values	false
			Topology	SURFACE
			Tags	[]
		+-	Index	16
2			Domain.Compressor	
			Interfaces	
			Part Surfaces	[Domain.Compressor]
			Type	Wall
			Allow Per-Surface Values	false
			Topology	SURFACE
			Tags	[]
		+-1	Physics	
			Conditions	
		+-1	Reference	Option
			Frame Specification	Region Reference Frame
		+-2	Shear Stress	Method
			Specification	No-Slip
		+-3	Tangential	Method
			Velocity Specification	Fixed
		+-4	Thermal	Condition
			Specification	Adiabatic
		+-5	User Wall Heat	Method
			Flux Coefficient Specification	None
		-6	Wall Surface	Method
			Specification	Smooth
		-2	Physics Values	
		-1	Blended Wall	E
			Function	9.0
			Kappa	0.42
		+-3	Domain.Inlet	Index
				13
			Interfaces	
			Part Surfaces	[Domain.Inlet]
			Type	Velocity Inlet
			Allow Per-Surface Values	false
			Topology	SURFACE
			Tags	[]
		+-1	Physics	
			Conditions	
		+-1	Flow Direction	Method
			Specification	Boundary-Normal

++2 Reference	Option	Lab Frame
Frame Specification		
++3 Turbulence	Method	Intensity + Viscosity Ratio
Specification		
`-4 Velocity	Method	Magnitude + Direction
Specification		
`-2 Physics Values		
++1 Static	Method	Constant
Temperature		
`-1 Constant	Value	301.6983408 K
++2 Turbulence	Method	Constant
Intensity		
`-1 Constant	Value	0.01
++3 Turbulent	Method	Constant
Viscosity Ratio		
`-1 Constant	Value	10.0
`-4 Velocity	Method	Constant
Magnitude		
`-1 Constant	Value	115.7194412 m/s
++4 Domain.Nozzle	Index	18
	Interfaces	
	Part Surfaces	[Domain.Nozzle]
	Type	Wall
	Allow Per-Surface Values	false
	Topology	SURFACE
	Tags	[]
++1 Physics		
Conditions		
++1 Reference	Option	Region Reference Frame
Frame Specification		
++2 Shear Stress	Method	No-Slip
Specification		
++3 Tangential	Method	Fixed
Velocity Specification		
++4 Thermal	Condition	Adiabatic
Specification		
++5 User Wall Heat	Method	None
Flux Coefficient Specification		
`-6 Wall Surface	Method	Smooth
Specification		
`-2 Physics Values		
`-1 Blended Wall	E	9.0
Function		
	Kappa	0.42
++5 Domain.Outlet	Index	15
	Interfaces	
	Part Surfaces	[Domain.Outlet]
	Type	Pressure Outlet
	Allow Per-	false

	Surface Values	
	Topology	SURFACE
	Tags	[]
++1 Physics		
Conditions		
++1 Backflow	Direction	Extrapolated
Specification	Pressure	Static
	Scalars	Specified
++2 Pressure Outlet	Option	None
Option		
\-3 Turbulence	Method	Intensity + Viscosity Ratio
Specification		
\-2 Physics Values		
++1 Pressure	Method	Constant
\-1 Constant	Value	9800.45415 Pa
++2 Static	Method	Constant
Temperature		
\-1 Constant	Value	299.55 K
++3 Turbulence	Method	Constant
Intensity		
\-1 Constant	Value	0.01
\-4 Turbulent	Method	Constant
Viscosity Ratio		
\-1 Constant	Value	10.0
++6 Domain.Wall	Index	14
	Interfaces	
	Part	[Domain.Wall]
	Surfaces	
	Type	Wall
	Allow	false
	Per-Surface Values	
	Topology	SURFACE
	Tags	[]
++1 Physics		
Conditions		
++1 Reference	Option	Region Reference Frame
Frame Specification		
++2 Shear Stress	Method	No-Slip
Specification		
++3 Tangential	Method	Vector
Velocity Specification		
++4 Thermal	Condition	Adiabatic
Specification		
++5 User Wall Heat	Method	None
Flux Coefficient Specification		
++6 Wall Energy	Circumferential Averaging of Energy	false
Averaging Option		
\-7 Wall Surface	Method	Smooth
Specification		
\-2 Physics Values		

Function	+-1 Blended Wall	E	9.0
		Kappa	0.42
Velocity	-2 Relative	Method	Constant
		Coordinate System	Laboratory
	-1 Constant	Value	[125.0, 0.0] m/s
	-7 Domain.Wall Pod	Index	17
		Interfaces	
		Part Surfaces	[Domain.Wall Pod]
		Type	Wall
		Allow Per-Surface Values	false
		Topology	SURFACE
		Tags	[]
Conditions	+-1 Physics		
Frame Specification	+-1 Reference	Option	Region Reference Frame
Specification	+-2 Shear Stress	Method	No-Slip
Velocity Specification	+-3 Tangential	Method	Fixed
Specification	+-4 Thermal	Condition	Adiabatic
Flux Coefficient Specification	+-5 User Wall Heat	Method	None
Specification	-6 Wall Surface	Method	Smooth
	-2 Physics Values		
Function	-1 Blended Wall	E	9.0
		Kappa	0.42
	+-2 Physics Conditions		
Option	+-1 Energy Source	Energy Source Option	None
Option	+-2 Initial Condition	Option	Use Continuum Values
	+-3 Mass Source Option	Mass Source Option	false
Option	+-4 Momentum Source	Momentum Source Option	None
Option	+-5 Motion Specification	Option	Motion Specification
Option	-6 Turbulence Source	Turbulence Source Option	None
	-3 Physics Values		

			+-1 Axis	Coordinate System	Laboratory
				Origin	[0.0, 0.0] m
				Direction	[0.0, 0.0, 1.0]
			\-2 Motion Specification	Motion	Stationary
				Reference Frame	Lab Reference Frame
			+-3 Representations		
			+-1 Latest Surface/Volume	Representation	Volume Mesh
				Tags	[]
			+-2 Geometry	Tags	[]
			\-1 Latest Surface	Tags	[]
			\-3 Volume Mesh	Cells	95147
				Interior Faces	188288
				Vertices	97152
				Tags	[]
			+-1 Finite Volume Regions		
			\-1 Region	Cells	95147
				Interior Faces	188288
				Vertices	97152
				Edges	0
			\-1 Finite Volume Boundaries		
			+-1 Domain.Axis	Faces	1025
			+-	Faces	83
			2 Domain.Compressor		
			+-3 Domain.Inlet	Faces	34
			+-4 Domain.Nozzle	Faces	83
			+-5 Domain.Outlet	Faces	34
			+-6 Domain.Wall	Faces	2000
			\-7 Domain.Wall	Faces	751
			Pod		
			\-2 Cell Sets		
			+-4 Contacts		
			+-5 Parts		
			+-1 Block	Metadata	{}
				Index	2
				Color	java.awt.Color[r=112,g=128,b=144]
				Is Shell	false
				Region	[]
				Contacts	[]
				Descriptions	[Root]
				Face Count	12
				Coordinate System	Laboratory
				Corner 1	[-23.142924731639223, 0.0, 0.0] m,m,m
				Corner 2	[-0.9691681644366845, 1.1220281682766746, 1.0] m,m,m
				Tags	[]
			+-1 Surfaces		

-1	Block Surface	Index	10
		Metadata	{}
		Boundary	[]
		Color	java.awt.Color[r=112,g=128,b=144]
		Tags	[]
-2	Curves		
-1	Block Curve	Index	3
		Tags	[]
-2	Domain	Metadata	{}
		Index	1
		Color	java.awt.Color[r=112,g=128,b=144]
		Is Shell	false
		Region	[Region]
		Contacts	[]
		Descriptions	[Root]
		Face Count	104
		Tags	[Region (2D Mesh)]
+-1	Surfaces		
+-1	Axis	Index	1
		Metadata	{}
		Boundary	[Region: Domain.Axis]
		Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
		Tags	[Boundary (2D Mesh)]
+-2	Back	Index	5
		Metadata	{}
		Boundary	[]
		Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
		Tags	[Region (2D Mesh)]
+-3	Compressor	Index	7
		Metadata	{}
		Boundary	[Region: Domain.Compressor]
		Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
		Tags	[Boundary (2D Mesh)]
+-4	Front	Index	2
		Metadata	{}
		Boundary	[]
		Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
		Tags	[]
+-5	Inlet	Index	3
		Metadata	{}
		Boundary	[Region: Domain.Inlet]
		Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
		Tags	[Boundary (2D Mesh)]
+-6	Nozzle	Index	9
		Metadata	{}
		Boundary	[Region: Domain.Nozzle]
		Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
		Tags	[Boundary (2D Mesh)]
+-7	Outlet	Index	6
		Metadata	{}
		Boundary	[Region: Domain.Outlet]
		Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
		Tags	[Boundary (2D Mesh)]

			+-8 Wall	Index	4
				Metadata	{}
				Boundary	[Region: Domain.Wall]
				Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
				Tags	[Boundary (2D Mesh)]
			`-9 Wall Pod	Index	8
				Metadata	{}
				Boundary	[Region: Domain.Wall Pod]
				Color	java.awt.Color[r=135,g=206,b=250]
				Tags	[Boundary (2D Mesh)]
			`-2 Curves		
			+-1 Default	Index	1
				Tags	[]
			`-2 Pod	Index	2
				Tags	[]
			+-6 3D-CAD Models		
			`-1 3D-CAD Model 1	Distinguish Bodies Color Palette	High Contrast Color Palette
				Part Update Method	UPDATE_GEOMETRY
				Tags	[]
			+-1 Body Groups		
			`-1 Body 3	Name	Body 3
				Color	java.awt.Color[r=128,g=128,b=128]
				Opacity	1.0
				Display Resolution	VERY_COARSE
				Tags	[]
			+-2 Features		
			+-1 XY	Error Message	
				Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m
				X-Axis	[1.0, 0.0, 0.0]
				Y-Axis	[0.0, 1.0, 0.0]
				Tags	[]
			+-2 YZ	Error Message	
				Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m
				X-Axis	[0.0, 1.0, 0.0]
				Y-Axis	[0.0, 0.0, 1.0]
				Tags	[]
			+-3 ZX	Error Message	
				Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m
				X-Axis	[0.0, 0.0, 1.0]
				Y-Axis	[1.0, 0.0, 0.0]
				Tags	[]
			+-4 Global Origin	Error Message	
				Position	[0.0, 0.0, 0.0]
				Tags	[]



		+-5 Lab Coordinate	Error Message	
			Origin	[0.0, 0.0, 0.0]
			X-axis Direction	[1.0, 0.0, 0.0]
			Y-axis Direction	[0.0, 1.0, 0.0]
			Tags	[]
		+-6 Block 1	Error Message	
			Length (X Distance)	\${Length}
			Width (Y Distance)	\${Htunnel}
			Height (Z Distance)	0.1 m
			Base Center	[-10.5, \${Htunnel}/2, 0.0]
			Tags	[]
		+-7 Sketch 1	Error Message	
			Tags	[]
		+-8 Extrude 1	Error Message	
			Input Type	Sketch
			Sketch	Sketch 1
			Direction Axis	[0.0, 0.0, 1.0] m,m,m
			Method	Blind
			Direction Type	Normal
			Extrusion Options	TwoWaySymmetric
			Distance	-1.3081492451188048 m
			Asym. Distance	0.1 m
			Draft	None
			Draft Angle	10.0 deg
			Offset Distance	0.1 m
			Body Type	Sheet
			Body Interaction	Merge
			Bodies To Interact	All
			Tags	[]
		+-9 ThickenBodies 1	Error Message	
			Direction	FrontSide
			Thickness	0.01 m
			Tolerance	1.0E-7 m
			Tags	[]

		+-10	SubtractBodies 1	Error Message	
				Keep Tool Bodies	false
				Imprint	false
				Precision Type	Precise
				Tolerance	1.0E-5 m
				Use Auto-Matching	true
				Transfer Face Names	true
				Transfer Body Names	false
				Body Group	false
				Tags	[]
		^-11	DeleteBody 1	Error Message	
				Delete Mode	Manual
				Solids	None
				Minimum Volume	0.001 m^3
				Maximum Volume	0.002 m^3
				Sheets	None
				Minimum Area	0.001 m^2
				Maximum Area	0.002 m^2
				Tags	[]
		+-3	Design Filters		
		^-4	Design Parameters		
		+-1	Distance	Type	Scalar
				Value	#{pod}
				Evaluated SI Value	5.972
				Dimensions	Length
				Parent Feature	Sketch 1
				Tags	[]
		+-2	Podpos	Type	Scalar
				Value	#{podpos}
				Evaluated SI Value	15.0
				Dimensions	Length
				Parent Feature	Sketch 1
				Tags	[]
		+-3	Radius	Type	Scalar
				Value	0.3175262970353521 m

		Evaluated SI Value	0.3175262970353521
		Dimensions	Length
		Parent Feature	Sketch 1
		Tags	[]
	+-4 Radius2	Type	Scalar
		Value	#{Dpod}-#{r}
		Evaluated SI Value	0.10462499999999997
		Dimensions	Length
		Parent Feature	Sketch 1
		Tags	[]
	+-5 Rc	Type	Scalar
		Value	#{rc}
		Evaluated SI Value	0.670375
		Dimensions	Length
		Parent Feature	Sketch 1
		Tags	[]
	-6 Rn	Type	Scalar
		Value	#{rn}
		Evaluated SI Value	0.670375
		Dimensions	Length
		Parent Feature	Sketch 1
		Tags	[]
	+-7 Operations		
	+-1 Badge for 2D Meshing	Input Parts	[Domain]
		Tags	[]
	-2 Automated Mesh (2D)	Per-Part Meshing	false
		Mesher Execution Mode	Concurrent
		Input Parts	[Domain]
		Preserve Surface Perimeters	None
		Verbose Output	false
		Tags	[]
	+-1 Meshers		
	+-1 Quadrilateral Mesher	Perform Curvature Refinement	true

			Perform Proximity Refinement	true
			Perform Compatibility Refinement	false
			Create Aligned Meshes	true
			Minimum Face Quality	0.05
			Field Function based Refinement	[]
		^-2 Prism Layer Mesher	Stretching Function	Geometric Progression
			Distribution Mode	Stretch Factor
		+--2 Default Controls		
		+-1 Base Size	Base Size	#{BaseSize}
			Base Size	#{BaseSize}
		+-2 CAD Projection	Project to CAD	true
			Sort Criteria	Default
		+-4 Target Surface Size	Size Type	Relative to base
			Percentage of Base	100.0
			Absolute Size	0.075 m
Size		+-5 Minimum Surface Size	Size Type	Relative to base
			Percentage of Base	16.0
			Absolute Size	0.012 m
		+-6 Surface Curvature	Enable Curvature Deviation Distance	false
			# Pts/circle	36.0
			Max # Pts/circle	200.0
			Curvature Deviation Distance	0.01 m
			+-7 Surface Proximity	Search Floor



		# Points in gap	2.0
		Enable Search Ceiling	false
		Search Ceiling	1.0E10 m
		Search Direction	INSIDE
	^-8	Surface Growth Rate	USER_SPECIFIED
		User Specified Value	1.06
	^-3	Custom Controls	
	+-1	Pod Control	
		Enable Control	true
		Controls Display Mode	All
		Part Surfaces	[Domain.Compressor, Domain.Nozzle, Domain.Wall Pod]
		Apply Only to Contacting Area	false
		Tags	[]
	+-1	Controls	
Size	+-1	Target Surface Size	Custom
Surface Size	+-2	Minimum Surface Size	Parent
Curvature	+-3	Surface Curvature	Parent
Proximity	+-4	Surface Proximity	Parent
Rate	+-5	Edge Proximity	Parent
	+-6	Surface Growth Rate	Custom
Method	+-7	Meshing Method	Parent
	+-8	Prism Layers	Custom
	^-1	Customize Number of Layers	true
		Customize Total Thickness	true
		Customize Distribution	true



			Override Boundary Defaults	false
			Customize Minimum Thickness Percentage	false
			Customize Boundary March Angle	false
			Customize Concave Angle Limit	false
			Customize Convex Angle Limit	false
Refinement		\-9 Wake	Specify wake refinement options	true
		\-2 Values		
Size		+-1 Target Surface	Size Type	Relative to base
			Percentage of Base	10.0
			Absolute Size	0.0075 m
Values		+-2 Custom Prism		
Prism Layers		+-1 Number of	Number of Prism Layers	13
Stretching		+-2 Prism Layer	Prism Layer Stretching	1.4
Total Thickness		\-3 Prism Layer	Size Type	Absolute
			Percentage of Base	24.0
			Absolute Size	0.018 m
Rate		+-3 Surface Growth	Surface Growth Rate	USER_SPECIFIED
			User Specified Value	1.2
Refinement		\-4 Wake	Size type	Relative to base



			Distance	12.0 m
			Coordinate System	Laboratory
			Direction	[1.0, 0.0, 0.0]
			Spread Angle	0.0 radian
Size		+-1 Isotropic	Size Type	Relative to base
			Percentage of Base	30.0
			Absolute Size	0.0225 m
Refinement		-2 Wake	Growth Rate	1.35
		+-2 Wall top control	Enable Control	true
			Controls Display Mode	All
			Part Surfaces	[Domain.Wall]
			Apply Only to Contacting Area	false
			Tags	[]
		+-1 Controls		
Size		+-1 Target Surface	Target Surface Size	Custom
Surface Size		+-2 Minimum	Minimum Surface Size	Parent
Curvature		+-3 Surface	Curvature	Parent
Proximity		+-4 Surface	Proximity	Parent
		+-5 Edge Proximity	Proximity	Parent
Rate		+-6 Surface Growth	Surface Growth Rate	Parent
Method		+-7 Meshing	Meshing Method	Parent
		+-8 Prism Layers	Prism Layers	Parent
Refinement		-9 Wake	Specify wake refinement options	false
		-2 Values		
Size		-1 Target Surface	Size Type	Absolute
			Percentage of Base	33.33333333333336



		Absolute Size	0.025 m
	^-3 Y+ wall	Enable Control	true
		Controls Display Mode	All
		Part Surfaces	[Domain.Wall]
		Apply Only to Contacting Area	false
		Tags	[]
	+-1 Controls		
Size	+-1 Target Surface	Target Surface Size	Parent
Surface Size	+-2 Minimum	Minimum Surface Size	Parent
Curvature	+-3 Surface	Curvature	Parent
Proximity	+-4 Surface	Proximity	Parent
	+-5 Edge Proximity	Proximity	Parent
Rate	+-6 Surface Growth	Surface Growth Rate	Parent
Method	+-7 Meshing	Meshing Method	Parent
	+-8 Prism Layers	Prism Layers	Custom
	^-1 Customize	Customize Number of Layers	true
		Customize Total Thickness	true
		Customize Distribution	true
		Override Boundary Defaults	false
		Customize Minimum Thickness Percentage	false
		Customize Boundary March Angle	false



		Customize Concave Angle Limit	false
		Customize Convex Angle Limit	false
Refinement	Wake	Specify wake refinement options	false
	Values		
	Custom Prism		
Prism Layers	Number of Prism Layers	Number of Prism Layers	11
Stretching	Prism Layer Stretching	Prism Layer Stretching	1.4
Total Thickness	Prism Layer Size Type	Size Type	Absolute
		Percentage of Base	33.333333333333336
		Absolute Size	0.025 m
	Descriptions	Number of Children	3
	Root	Described Parts	[Domain, Block]
	Latest Surface	Described Parts	[Domain, Block]
		Faces	116
		Vertices	62
		Preview Mesh Operation Parts	false
	Latest Surface/Volume	Described Parts	[Domain, Block]
	Coordinate Systems		
	Laboratory	Tags	[]
	Local Coordinate Systems		
	Cartesian 1	X Axis Input	[-1.0, 0.0, 0.0]
		Vector on X-Y Plane Input	[0.0, 1.0, 0.0]
		X Axis Direction	[-1.0, 0.0, 0.0]
		Y Axis Direction	[0.0, 1.0, 0.0]

	Z Axis Direction	[0.0, 0.0, -1.0]
	Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m,m,m
	Reference System	Laboratory
	Tags	[]
-1 Local Coordinate Systems		
--33 Layout Views		
--34 User Libraries		
--35 Automation		
+-1 Parameters		
+-1 a_ref	Type	SCALAR
	Value	$\sqrt{\{g\} * \{R\} * 300}$
	Tags	[]
+-2 Area frontal	Type	SCALAR
	Value	$3.14159 * \{Dpod\} * \{Dpod\} / 4$
	Tags	[]
+-3 BaseSize	Type	SCALAR
	Value	0.075
	Tags	[]
+-4 BR	Type	SCALAR
	Value	0.46
	Tags	[]
+-5 Dpod	Type	SCALAR
	Value	0.775
	Tags	[]
+-6 File	File	DeltaX_table_table_2.csv
	Tags	[]
+-7 g	Type	SCALAR
	Value	1.400566
	Tags	[]
+-8 Htunnel	Type	SCALAR
	Value	1.25
	Tags	[]
+-9 Length	Type	SCALAR
	Value	50.0
	Tags	[]
+-10 lpod	Type	SCALAR
	Value	5.972
	Tags	[]
+-11 mc	Type	SCALAR
	Value	0.9422
	Tags	[]
+-12 minlet	Type	SCALAR
	Value	0.0
	Tags	[]
+-13 p_ref	Type	SCALAR
	Value	10000.0 Pa
	Tags	[]
+-14 podpos	Type	SCALAR
	Value	15.0
	Tags	[]
+-15 R	Type	SCALAR

	Value	287.0382 J/kg-K
	Tags	[]
+-16 rc	Type	SCALAR
	Value	0.865*\${Dpod}
	Tags	[]
+-17 rn	Type	SCALAR
	Value	0.865*\${Dpod}
	Tags	[]
^-18 U	Type	SCALAR
	Value	125.0
	Tags	[]
+-2 Field Functions		
+-1 Back		
+-1 A_A_re back	Function Name	A_A_re back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	\${A_A_outbackReport}
	Definition	\${A_A_outbackReport}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-2 A_A back	Function Name	A_A back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	((/ (/ \${SoundSpeed} \${a_ref}) (pow (/ \${Pressure} \${p_ref}) (/ (- \${Gamma} 1) 2) \${Gamma}))))
	Definition	(\${SoundSpeed} / \${a_ref}) / pow(\${Pressure} / \${p_ref}, (\${Gamma} - 1.) / 2. / \${Gamma})
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-3 a_re back	Function Name	a_re back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(((* \${a_ref} (+ \${beta_re back} \${lambda_re back})) 2)
	Definition	\${a_ref} * (\${beta_re back} + \${lambda_re back}) / 2
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]



+-4 beta_re back	Function Name	beta_re back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	`\${beta_outbackReport}`
	Definition	`\${beta_outbackReport}`
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-5 beta back	Function Name	beta back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(/ (- \text{SoundSpeed}) * (/ (- \text{Gamma}) 1) 2) \text{Velocity}[0]) \text{a_ref}$
	Definition	$(\text{SoundSpeed} - (\text{Gamma} - 1) / 2 . * \text{Velocity}[0]) / \text{a_ref}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-6 DeltaX back ff	Function Name	DeltaX back ff
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(* (+ (- \text{Velocity}[0]) \text{SoundSpeed}) \text{TimeStep})$
	Definition	$(- \text{Velocity}[0] + \text{SoundSpeed}) * \text{TimeStep}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-7 lambda_re back	Function Name	lambda_re back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(* (- (* 2 (\text{pow} (/ \text{p_re back} \text{p_ref}) (/ (- \text{g}) 1) * 2 \text{g})))) 1) \text{A_A_re back}$
	Definition	$(2 * \text{pow} (\text{p_re back} / \text{p_ref} , (\text{g} - 1) / (2 * \text{g})) - 1) * \text{A_A_re back}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]

+-8 lambda back	Function Name	lambda back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(/ (+ \text{\$SoundSpeed} * (/ (- \text{\$Gamma} 1) 2) \text{\$Velocity}[0])) \text{\a_ref}
	Definition	$(\text{\$SoundSpeed} + (\text{\$Gamma} - 1) / 2. * \text{\$Velocity}[0]) / \text{\$a_ref}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-9 NewX back ff	Function Name	NewX back ff
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(+ \text{\$X_BC back} \text{\$DeltaX back ff})$
	Definition	$\text{\$X_BC back} + \text{\$DeltaX back ff}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-10 p_out_BC back	Function Name	p_out_BC back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(* \text{\$p_ref} (\text{pow} (/ / \text{\$a_re back} \text{\$a_ref}) \text{\$A_A_re back}) / (* 2 \text{\$g}) (- \text{\$g} 1)))$
	Definition	$\text{\$p_ref} * \text{pow}(\text{\$a_re back} / \text{\$a_ref} / \text{\$A_A_re back}, 2 * \text{\$g} / (\text{\$g} - 1))$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-11 p_re back	Function Name	p_re back
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	10000
	Definition	1e4
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]



++12	p_t_out_BC back	Function Name	p_t_out_BC back
		Inverse Distance Weight	false
		Value Type	Scalar
		Assembly Code	(* \${p_out_BC back} (pow (/ \${T_t_re back} \${T_re back}) / \${g} (- \${g} 1))))
		Definition	\${p_out_BC back} * pow(\${T_t_re back} / \${T_re back}, \${g} / (\${g} - 1))
		Ignore Boundary Values	false
		Tags	[]
++13	T_re back	Function Name	T_re back
		Inverse Distance Weight	false
		Value Type	Scalar
		Assembly Code	(/ (/ (pow \${a_re back} 2) \${g}) \${R})
		Definition	pow(\${a_re back}, 2) / \${g} / \${R}
		Ignore Boundary Values	false
		Tags	[]
++14	T_t_re back	Function Name	T_t_re back
		Inverse Distance Weight	false
		Value Type	Scalar
		Assembly Code	(+ \${T_re back} (/ (* (/ (/ (* \${u_re back} \${u_re back}) 2) \${g}) (- \${g} 1)) \${R}))
		Definition	\${T_re back} + \${u_re back} * \${u_re back} / 2 / \${g} * (\${g} - 1) / \${R}
		Ignore Boundary Values	false
		Tags	[]
^-15	u_re back	Function Name	u_re back
		Inverse Distance Weight	false
		Value Type	Scalar
		Assembly Code	(/ (* \${a_ref} (- \${lambda_re back} \${beta_re back})) (- \${g} 1))
		Definition	\${a_ref} * (\${lambda_re back} - \${beta_re back}) / (\${g} - 1)
		Ignore Boundary Values	false

	Tags	[]
+-2 Front		
+-1 A_A	Function Name	A_A
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	((/ \${SoundSpeed} \${a_ref}) (pow (/ \${Pressure} \${p_ref}) (/ (- \${Gamma} 1) 2) \${Gamma})))
	Definition	(\${SoundSpeed} / \${a_ref}) / pow(\${Pressure} / \${p_ref}, (\${Gamma} - 1.) / 2. / \${Gamma})
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-2 A_A_inc	Function Name	A_A_inc
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	1
	Definition	1
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-3 A_A_re	Function Name	A_A_re
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	\${A_A_out}
	Definition	\${A_A_out}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-4 a_inc	Function Name	a_inc
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(((* \${a_ref} (+ \${lambda_inc} \${beta_inc}))) 2)
	Definition	\${a_ref} * (\${lambda_inc} + \${beta_inc}) / 2
	Ignore Boundary Values	false

	Tags	[]
+-5 a_re	Function Name	a_re
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(((* \${a_ref} (+ \${beta_re} \${lambda_re})) 2)
	Definition	\${a_ref} * (\${beta_re} + \${lambda_re}) / 2
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-6 beta	Function Name	beta
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(((- \${SoundSpeed} * (((- \${Gamma} 1) 2) \${Velocity}[0])) \${a_ref})
	Definition	((\${SoundSpeed} - (\${Gamma} - 1) / 2. * \${Velocity}[0]) / \${a_ref}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-7 beta_inc	Function Name	beta_inc
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	\${beta_inReport}
	Definition	\${beta_inReport}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-8 beta_re	Function Name	beta_re
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(((- (* 2 (pow (/ \${p_re} \${p_ref}) (((- \${g} 1) (* 2 \${g})))) 1) \${A_A_re})
	Definition	((2 * pow(\${p_re} / \${p_ref}, (\${g} - 1) / (2 * \${g})) - 1) * \${A_A_re}
	Ignore Boundary Values	false

	Tags	[]
+-9 Condition DeltaX ff	Function Name	Conditions DeltaX ff
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(if (== \${Position}[0] \${DeltaX ff}) 1 0)
	Definition	(\${Position}[0] == \${DeltaX ff})?1:0
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-10 DeltaX ff	Function Name	DeltaX ff
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(* (+ \${Velocity}[0] \${SoundSpeed}) \${TimeStep})
	Definition	(\${Velocity}[0] + \${SoundSpeed})*\${TimeStep}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-11 lambda	Function Name	lambda
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(/ (+ \${SoundSpeed} (* (/ (- \${Gamma} 1) 2) \${Velocity}[0])) \${a_ref})
	Definition	(\${SoundSpeed} + (\${Gamma} - 1) / 2. * \${Velocity}[0]) / \${a_ref}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-12 lambda_inc	Function Name	lambda_inc
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(* (- (* 2 (pow (/ \${p_inc} \${p_ref}) / (- \${g} 1) (* 2 \${g})))) 1) \${A_A_inc})
	Definition	(2 * pow(\${p_inc} / \${p_ref}, (\${g} - 1) / (2 * \${g})) - 1) * \${A_A_inc}
	Ignore Boundary Values	false

	Tags	[]
+-13 lambda_re	Function Name	lambda_re
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	#{lambda_outReport}
	Definition	#{lambda_outReport}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-14 NewX ff	Function Name	NewX ff
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(- #{X_BC} #{DeltaX ff})
	Definition	#{X_BC}-#{DeltaX ff}
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-15 p_in_BC	Function Name	p_in_BC
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(* #{p_ref} (pow (/ (/ #{a_inc} #{a_ref}) #{A_A_inc}) / (* 2 #{g}) (- #{g} 1))))
	Definition	#{p_ref} * pow(#{a_inc} / #{a_ref} / #{A_A_inc}, 2 * #{g} / (#{g} - 1))
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-16 p_inc	Function Name	p_inc
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	10000
	Definition	10000
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]

+-17 p_left	Function Name	p_right
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(* \{p_{ref}\} (\text{pow} (* 0.5 (+ 1 (* (\text{pow} (/ \{Pressure\} \{p_{ref}\}) / (- \{\Gamma\} 1) (* 2 \{\Gamma\})))) (+ 1 (* (/ (- \{\Gamma\} 1) 2) \{MachNumber\}))))) / (* 2 \{\Gamma\}) (- \{\Gamma\} 1)))$
	Definition	$\{p_{ref}\} * \text{pow}(0.5 * (1 + \text{pow}(\{Pressure\} / \{p_{ref}\}, (\{\Gamma\} - 1) / (2 * \{\Gamma\})) * (1 + (\{\Gamma\} - 1) / 2 * \{MachNumber\})) , 2 * \{\Gamma\} / (\{\Gamma\} - 1))$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-18 p_out_BC	Function Name	p_out_BC
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(* \{p_{ref}\} (\text{pow} (/ (/ \{a_{re}\} \{a_{ref}\}) \{A_{A_{re}}\}) / (* 2 \{g\}) (- \{g\} 1))))$
	Definition	$\{p_{ref}\} * \text{pow}(\{a_{re}\} / \{a_{ref}\} / \{A_{A_{re}}\}, 2 * \{g\} / (\{g\} - 1))$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-19 p_re	Function Name	p_re
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	10000
	Definition	1e4
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-20 p_right	Function Name	p_left
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(* \{p_{ref}\} (\text{pow} (* 0.5 (+ 1 (* (\text{pow} (/ \{Pressure\} \{p_{ref}\}) / (- \{\Gamma\} 1) (* 2 \{\Gamma\})))) (- 1 (*$



	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$((\text{pow } \{a_{re}\} 2) \{g\}) \{R\}$
	Definition	$\text{pow}(\{a_{re}\}, 2) / \{g\} / \{R\}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-25 T_t_in_BC	Function Name	T_t_in_BC
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(+ \{T_{inc}\} / (* (/ (* \{u_{inc}\} \{u_{inc}\}) 2) \{g\}) (- \{g\} 1)) \{R\}$
	Definition	$\{T_{inc}\} + \{u_{inc}\} * \{u_{inc}\} / 2 / \{g\} * (\{g\} - 1) / \{R\}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-26 T_t_re	Function Name	T_t_re
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(+ \{T_{re}\} / (* (/ (* \{u_{re}\} \{u_{re}\}) 2) \{g\}) (- \{g\} 1)) \{R\}$
	Definition	$\{T_{re}\} + \{u_{re}\} * \{u_{re}\} / 2 / \{g\} * (\{g\} - 1) / \{R\}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-27 u_inc	Function Name	u_inc
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	$(/ (* \{a_{ref}\} (- \{\lambda_{inc}\} \{\beta_{inc}\})) (- \{g\} 1))$
	Definition	$\{a_{ref}\} * (\{\lambda_{inc}\} - \{\beta_{inc}\}) / (\{g\} - 1)$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
^-28 u_re	Function Name	u_re

	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(((* $\{a_{ref}\}$ - $\{\lambda_{re}\}$ $\{\beta_{re}\}$)) (- $\{g\}$ 1))
	Definition	$\{a_{ref}\} * (\{\lambda_{re}\} - \{\beta_{re}\}) / (\{g\} - 1)$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-3 Adimensional	Function Name	PadimJosep
Pressure	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(((- $\{StaticPressure\}$ $\{Pinlet Adim\}$) (- $\{Max Pressure Adim\}$ $\{Min Press Adim\}$))
	Definition	$(\{StaticPressure\} - \{Pinlet Adim\}) / (\{Max Pressure Adim\} - \{Min Press Adim\})$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-4 Adimensional	Function Name	Adimensional Velocity
Velocity	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(($\{\{RelativeVelocity\}[0]\}$ $\{U\}$)
	Definition	$\{\{RelativeVelocity\}[0]\} / \{U\}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-5 constant	Function Name	constant
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	syntax error
	Definition	$\{Time\} < 6? \{U\} : final$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-6 Direction X	Function Name	Direction X

	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	(+ \${Position}[0] 15)
	Code	
	Definition	\${Position}[0]+15
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]
+-7 final	Function	final
	Name	
	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	0
	Code	
	Definition	0
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]
+-8 massflow_movref	Function	massflow_movref
	Name	
	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	(* \${Density} \${RelativeVelocity}[0])
	Code	
	Definition	\${Density}*\${RelativeVelocity}[0]
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]
+-9 massflow_movref out	Function	massflow_movref out
	Name	
	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	(* (/ (* \${Density} (pow \${Htunnel} 2)) 2)
	Code	\${wx_outReport})
	Definition	\${Density}*pow(\${Htunnel},2)/2*\${wx_outReport}
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]
+-10 minlet	Function	minlet
	Name	

	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	$(((* (U) (/ (/ (p_{ref} T_{inc}) R))) (pow$
	Code	$\{H_{tunnel} 2) 2)$
	Definition	$U * (p_{ref} / T_{inc} / R) * pow(H_{tunnel}, 2) / 2$
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]
+-11 Pnorm	Function	Pnorm
	Name	
	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	$((- TotalPressure) Pt_{inReport}) (-$
	Code	$MaximumReport MinimumReport))$
	Definition	$(TotalPressure - Pt_{inReport}) / (MaximumReport - MinimumReport)$
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]
+-12 ramp	Function	ramp
	Name	
	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	<code>interpolateTable(@Table("velo_ramp_galindo"), "tie</code>
	Code	<code>mpo", LINEAR, "u", Time)</code>
	Definition	<code>interpolateTable(@Table("velo_ramp_galindo"),</code>
		<code>"tiempo", LINEAR, "u", Time)</code>
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]
+-13 Ramp Galindo	Function	Ramp Galindo
	Name	
	Inverse	false
	Distance	
	Weight	
	Value	Scalar
	Type	
	Assembly	syntax error
	Code	
	Definition	$Time < 5 ? U * Time / 5 : constant$
	Ignore	false
	Boundary	
	Values	
	Tags	[]

+-14 V/Uref	Function Name	V/Uref
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(/ $\{\text{RelativeVelocity}\}[0] \{U\}$)
	Definition	$\{\text{RelativeVelocity}\}[0]/\{U\}$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-15 Velonorm	Function Name	Velonorm
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(/ (mag $\{\text{RelativeVelocity}\}$) 125)
	Definition	mag($\{\text{RelativeVelocity}\}$)/125
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-16 vpod	Function Name	vpod
	Inverse Distance Weight	false
	Value Type	Scalar
	Assembly Code	(/ (* $\{U\} \{\text{TimeStep}\}$) 8)
	Definition	$\{U\} * \{\text{TimeStep}\} / 8$
	Ignore Boundary Values	false
	Tags	[]
+-3 Simulation Operations	Selected	[]
+-4 Filters		
+-5 Tags		
+-1 Boundary (2D Mesh)	Color	java.awt.Color[r=255,g=255,b=40]
	Objects	[Domain.Axis, Domain.Inlet, Domain.Wall, Domain.Outlet, Domain.Compressor, Domain.Wall Pod, Domain.Nozzle]
` -2 Region (2D Mesh)	Color	java.awt.Color[r=140,g=25,b=25]
	Objects	[Domain, Domain.Back]
+-6 Stages	Active Stage	[]
+-7 Update Events	Event Count	0
	Event Names	



| \-8 Time Scales

Solution

Accumulated CPU Time over all processes (s)	12040.937000000069
Elapsed Time (s)	3008.9560000000165
Iterations	4037