



UNIVERSIDAD DE JAÉN

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA AERODINÁMICA DE UN MONOCICLO ELÉCTRICO

Alumno: David Colmenero Hernández

Tutor: Prof. D. Patricio Bohórquez Rodríguez de
Medina

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera





Índice

Abstract	6
Capítulo I.....	8
1.1. Introducción.....	8
1.2. Monociclo Kingsong KS-18L	9
1.2.1. Componentes del monociclo Kingsong KS-18L.....	10
1.2.2. Tipos de VMP	14
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo general.....	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	18
1.3.3. Justificación	18
Capítulo II.....	21
2.1. Marco teórico.	21
2.1.1. Nomenclatura y notación.	21
2.1.2. Sistema de referencia fijo.	22
2.1.3. Ecuación de la conservación de la masa:.....	23
2.1.4. Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento:.....	24
2.1.5. Sistema de referencia múltiple	24
2.1.6. Método de los volúmenes finitos.....	28
2.2. Metodología:	30
2.2.1. Diseño de la geometría.....	31
2.2.2. Creación de la malla.	33
2.2.3. Caracterizar parámetros de la simulación.	36
2.2.4. Simulación.	39
2.2.5. Segunda simulación.	40
2.2.6. Comprobación de la simulación.....	42



Capítulo III.	45
3.1. Resultados.	45
3.1.1. Campo fluido.....	45
3.1.2. Análisis del campo velocidad.....	48
3.1.3. Análisis del flujo en el interior del monociclo.....	52
3.1.4. Análisis del campo presión.	59
3.1.5. Análisis de la viscosidad.	61
3.1.6. Análisis de las fuerzas de arrastre.....	64
3.1.7. Garantía de convergencia.....	71
3.2. Conclusiones.....	78
Anexos.	80
Anexo 1. Índice de tablas.....	80
Anexo 2. Índice de ecuaciones	80
Anexo 3. Índice de figuras.....	80
Bibliografía:	86

Simulación numérica de la aerodinámica de un monociclo eléctrico.





Abstract.

En el presente trabajo fin de grado se caracteriza la aerodinámica del flujo de aire sobre un monociclo eléctrico. Este estudio es debido al creciente interés de la sociedad en los vehículos de movilidad personal y a ciertos inconvenientes observados en el comportamiento real en relación con la refrigeración del monociclo Kingsong KS-18L.

Con la intención de dar una explicación a los hechos apreciados, se ha simulado numéricamente un modelo que recrea el monociclo en un túnel de viento. Haciendo uso de los datos arrojados por OpenFoam (programa usado para la simulación), analizaremos la velocidad del flujo, las líneas de corriente y la viscosidad turbulenta entre otras muchas variables.

Por último, se da una explicación cualitativa de la relación entre los esfuerzos viscosos y la refrigeración entre la carcasa y el motor del monociclo. Gracias a ello, se puede explicar desde un punto de vista ingenieril el origen del problema de sobrecalentamiento observado en el motor eléctrico del monociclo objeto de estudio.

Simulación numérica de la aerodinámica de un monociclo eléctrico.





Capítulo I.

1.1. Introducción.

Los VMP (vehículos de movilidad personal) son vehículos que permiten trasladar personas haciendo uso de un motor eléctrico. Estos vehículos suelen estar dotados para alcanzar una velocidad máxima superior a los 25 Km/h con un diseño compacto.

Debido a su utilidad y coste están en pleno auge hasta el punto de que sus ventas desde enero de 2019 a enero de 2020 se han incrementado más del 1000%[1]. Este hecho hace que sea prioritario el diseño y optimización de dichos vehículos para que sigan siendo una opción más a la hora de desplazarse en una ciudad.

Como se puede apreciar en los vehículos de movilidad personal, desde el punto de vista del consumidor, los factores que más se tienen en cuenta son la autonomía, la ergonomía y la estética de estos. Desde el punto de vista del fabricante, a parte los puntos mencionados, es muy importante un buen diseño de la rueda para poder ofrecer mejores características.

Hasta los años 80, las ruedas se utilizaban en competición de la forma en que se conocen desde la antigüedad. En 1996 algunos de los constructores más importantes de radios y llantas decidieron ofertar montajes integrales de ruedas de alta gama, utilizando los materiales de más alta tecnología para realizar este proyecto [2].

A día de hoy los fabricantes dedican mucho tiempo al ensayo de las ruedas en túneles de viento para obtener diseños con menos resistencia a este. De esta forma ha sido posible evolucionar desde las ruedas tradicionales (Figura 1) hasta las lenticulares (Figura 1) en las que se han reducido el número de radios [3].



Figura 1. Rueda Clásica [4]



Figura 2. Rueda Lenticular [5]

1.2. Monociclo Kingsong KS-18L

Los monociclos eléctricos son una de las formas más innovadoras de desplazamiento por la ciudad. Son vehículos para una sola persona con una autonomía de hasta 120 km y una velocidad máxima de 45 km/h como es nuestro caso. Estas características y su diseño innovador y llamativo hacen que cada vez tengan más peso en el mercado de los VMP.

Nuestro objeto de estudio es el monociclo Kingsong KS-18L (Figura 3). Podemos asemejar la importancia de la aerodinámica de nuestro vehículo a la que tiene una rueda de bicicleta. En las bicicletas se ha determinado que las ruedas tienen un impacto del 10% de la resistencia combinada ciclista-rueda [6]. Este dato podemos extrapolarlo a nuestro proyecto ya que, aunque tenemos solo una rueda, el diseño de esta no es tan esbelto ni ligero como el de una bicicleta.



Figura 3. Modelo Kingsong KS 18L.
[6]

1.2.1. Componentes del monociclo Kingsong KS-18L

De cara a conocer un poco mejor el vehículo sobre el que vamos a hacer el estudio, se presentará cada elemento mecánico que lo compone:

- Monociclo completo: haciendo uso de la patente y un archivo de video con el desmontaje podremos hacernos una idea de cómo es el monociclo interior (Figuras 4 y 5) y exteriormente (Figuras 6, 7 y 8). Los números en las figuras 4 y 5 muestran los distintos componentes que posteriormente los nombraré uno a uno [7].

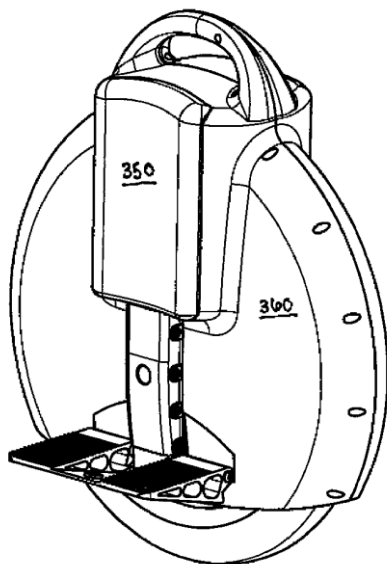


Figura 4. Esquema de un monociclo genérico (Patente)

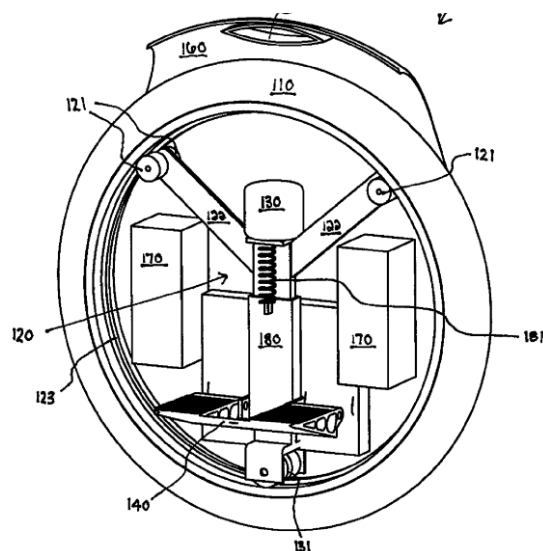


Figura 5. Interior de un monociclo genérico (Patente)

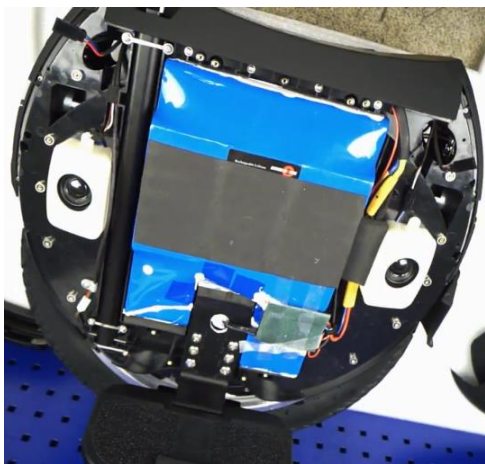


Figura 6. Interior real del modelo KS-18L [8].



Figura 7. Interior real de la rueda [8].



Figura 8. Desmontaje Kingsong KS-18L [8].

- Componentes del monociclo: debemos tener en cuenta que vamos a estudiar la aerodinámica, es decir, el interior de la carcasa lo podemos obviar ya que no interfiere con el exterior.

Primeramente, se va a presentar la geometría completa implementada en Catia (Figura 9). De esta iremos desglosando el resto de elementos que la componen.

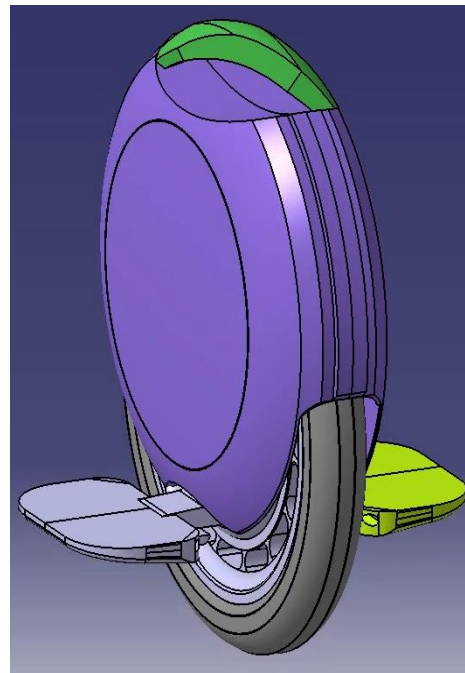


Figura 9. Kingsong KS-18L modelado en Catia

A partir de la pieza principal podemos distinguir dos geometrías principales, las cuales son la carcasa (Figura 10) y el conjunto de llanta y neumático (Figura 11).

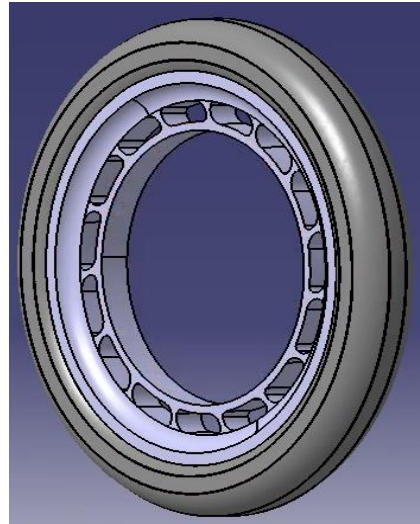
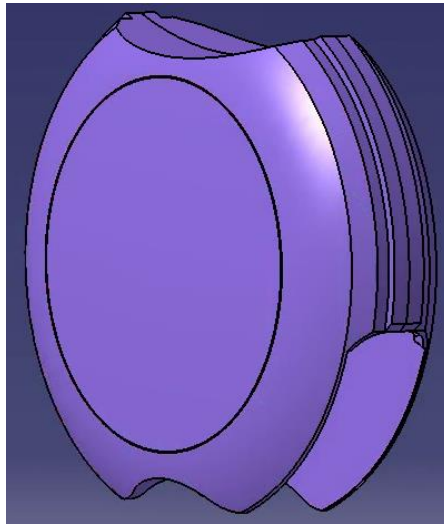


Figura 10. Carcasa Kingsong KS-18L.

Figura 11. Rueda y llanta Kingsong KS-18L.

Otros componentes también de gran importancia para nuestro trabajo van a ser la tapa del motor (Figura 12), los pedales (Figura 13), los soportes de estos y el asa de transporte (Figura 14).

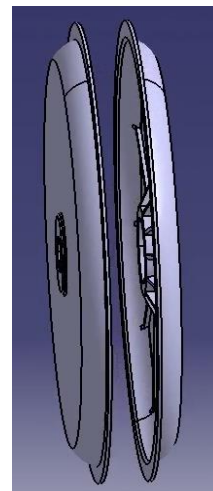
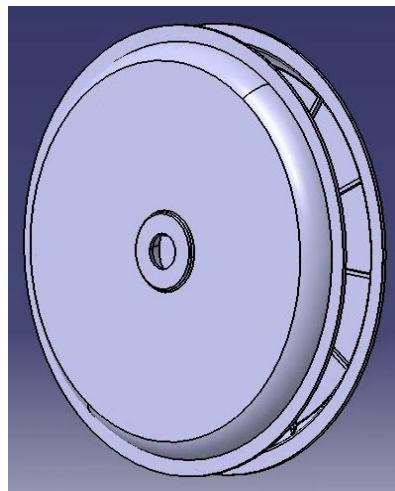


Figura 12. Tapas de motor.

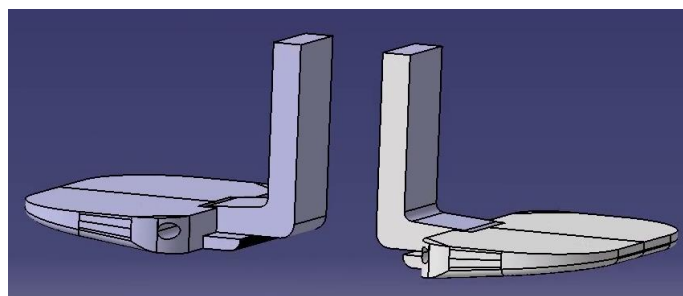


Figura 13. Pedales y soportes de pedales.

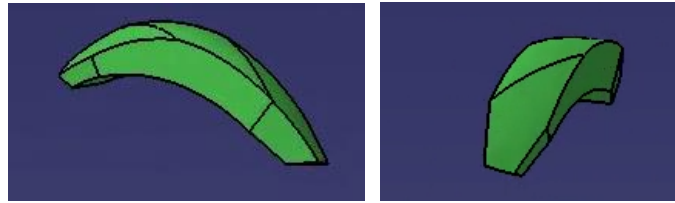


Figura 14. Asa de transporte.

Por último, aunque no nos afecte para nuestra futura simulación, se presentarán también las partes que componen el interior de la rueda. En él tenemos el estator (Figura 15) y la parte magnética (rotor) (Figura 16). Además, se adjuntan los rodamientos con los que se ajusta el estator a las tapas del motor (Figura 17).

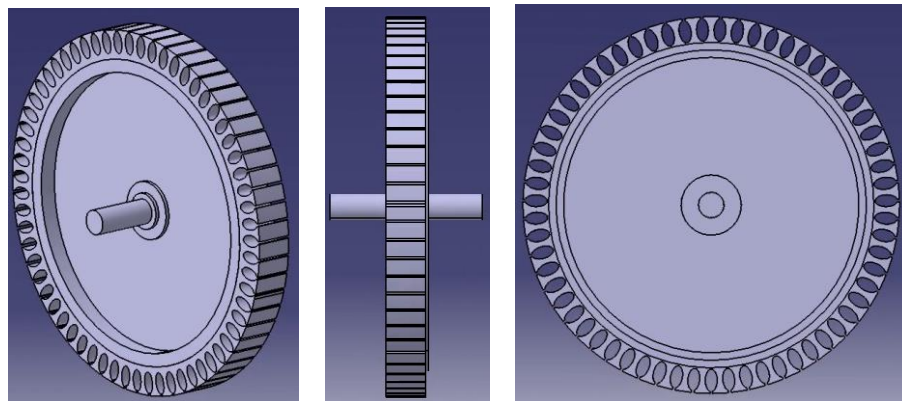


Figura 15. Estator.

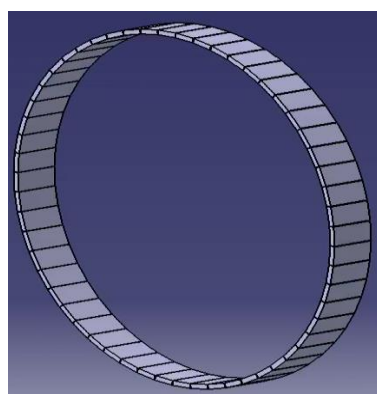


Figura 16. Magnetismos (rotor).

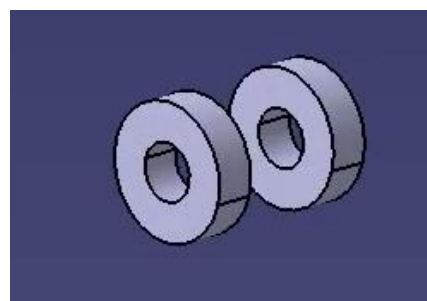


Figura 17. Rodamientos.

1.2.2. Tipos de VMP

Existen varios tipos de vehículos de movilidad personal como por ejemplo segways, monociclos o patinetes. Vamos a ver las diferencias entre ellos para conocerlos un poco mejor.

- Patinetes eléctricos (Figura 18): son posiblemente los más conocidos y con mayor número de ventas en los últimos años. Esto es debido a su facilidad para manejarlos (Figura 20) y las características que ofrecen como la autonomía de hasta 45 km a una velocidad máxima de 25 km/h. También debe considerarse que se pueden plegar (Figura 19), lo que hace que sean fáciles de guardar, aunque no de transportar, ya que algunos pesan hasta 20 kg.



Figura 18. Xiaomi Mi Scooter Pro. [9]



Figura 19. Mi Scooter Pro plegada. [10]



Figura 20. Uso Xiaomi Mi Scooter pro. [11]



- Monociclos eléctricos: estos vehículos son un poco más difíciles de manejar que los anteriores, ya que, como no cuenta con manillar, cuentan con un giroscopio electrónico incorporado para poder manejarlo. Debes tener una buena coordinación y equilibrio entre el cuerpo y los pies ya que la rueda se lleva entre las piernas (Figura 21). Si quieres desplazarte hacia delante debes inclinarte en ese mismo sentido, también, si quieres girar, debes inducir tu cuerpo hacia el lado que quieres ir (Figura 23). Adicionalmente, gozan de una fácil portabilidad similar a los patinetes eléctricos (Figura 22).

Estos vehículos al igual que los anteriores, cuentan con unas características bastante competitivas frente al resto de VMP si miramos la gama media que puede ir hasta los 30 km/h con una autonomía de entre 30 y 40 km. El mayor problema es el precio, el cual, para uno de gama media salta los 700€, mientras que los patinetes rondan los 400-500€.



Figura 21. Cómo subir a monociclo eléctrico. [12]



Figura 22. Portabilidad monociclo [12].



Figura 23. Giro con monociclo eléctrico.[13]

- Segways (Figura 24): estos vehículos de movilidad personal cuentan con una gran acogida en nuestras ciudades desde hace años. Su facilidad para manejarlos los hace muy atractivos a la hora de ir de un punto a otro. El manejo es parecido al de los monociclos en cuanto a inclinarse, aunque estos cuentan con 2 ruedas y manillar (Figura 25).

Al igual que los otros VMP, estos alcanzan los 25-30km/h y cuenta con hasta 45 km de autonomía. Aunque sus grandes inconvenientes los hacen menos atractivos que los anteriores para un uso diario. Las principales desventajas de estos son sus grandes dimensiones, peso y el alto coste que va hasta los 2500€.



Figura 24. Scooter Stickway Segway. [14]



Figura 25. Uso de un segway. [15]

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

La principal idea alrededor de la cual será construido este trabajo fin de grado es que, debido al auge de los vehículos eléctricos de movilidad personal, el funcionamiento de estos debe ser óptimo.

Es en este punto donde nace la necesidad de estudiar la aerodinámica del monociclo Kingsong KS-18L para entender como es la refrigeración en el interior de este, ya que, debido a unas pruebas realizadas, este vehículo alcanza su temperatura máxima permitida con facilidad.

Para llevar a cabo este estudio usaremos la geometría del monociclo mencionado anteriormente, la mallaremos y le daremos unas condiciones de contorno para asemejar lo máximo posible la simulación que se va a realizar con la realidad. La simulación se llevará a cabo con el software Helyx-OS (OpenFoam) y podremos estudiarla usando ParaView, que es el software que usa OpenFoam para analizar las distintas variables que se han considerado.



Finalmente, usando toda la información recabada del análisis de los parámetros en ParaView, podremos dar una respuesta firme al problema que consideramos al principio.

1.3.2. Objetivos específicos

- Manipular la geometría del monociclo Kingsong KS-18L.
- Crear el mallado para la geometría usando SnappyHexMesh.
- Caracterizar el flujo de aire.
- Llevar a cabo la simulación numérica con el software OpenFoam.
- Estudiar la capa límite sobre el cilindro.
- Analizar las líneas de corriente y de flujo.
- Determinar las implicaciones que tiene la aerodinámica de la capa límite en la capa exterior del motor.

1.3.3. Justificación

Sustentándonos en el idóneo comportamiento que deben tener los VMP, nuestra motivación viene dada por identificar el origen los fallos encontrados comunes a todos ellos. En este aspecto, el problema detectado tras varias pruebas con dichos medios de transporte es el sobrecalentamiento de los motores eléctricos.

En los siguientes tres gráficos se muestra el uso del monociclo Kingsong KS-18L en un sendero con inclinación, en concreto ha sido usado en la vía verde de Jaén en el tramo que va hacia Jabalcuz. Los datos han sido proporcionados por el profesor Dr. Patricio Bohórquez de Medina. En ellos podemos ver cómo se comporta la temperatura en la distancia que estamos recorriendo (Figura 26), la altitud del camino que ha recorrido (Figura 27) y la velocidad que ha tenido el monociclo en la prueba (Figura 28).

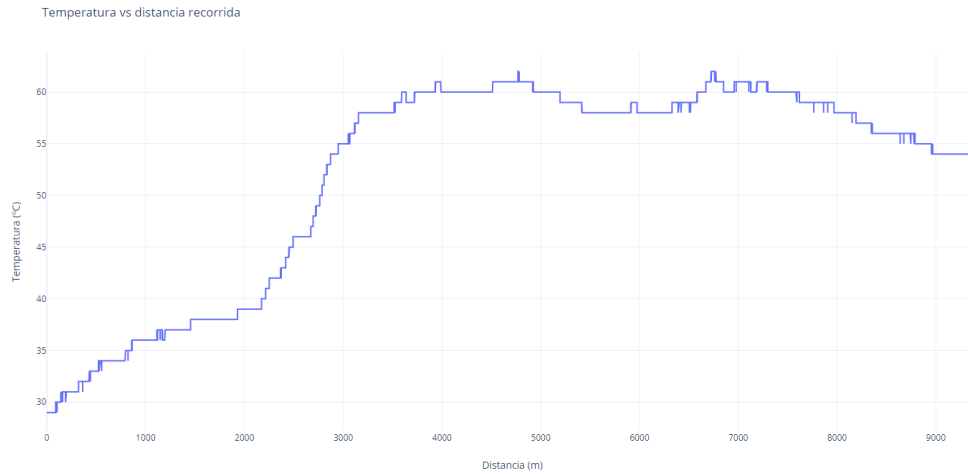


Figura 26. Temperatura frente a la distancia recorrida.

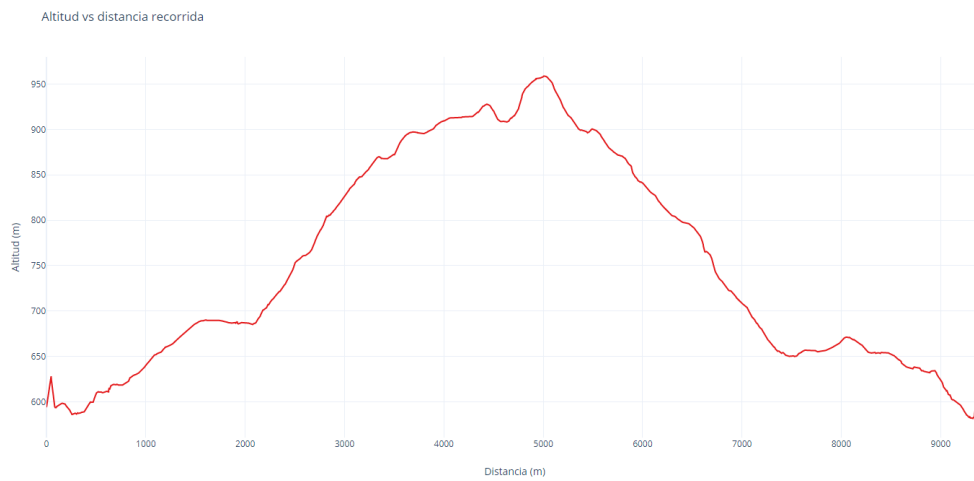


Figura 27. Altitud frente a la distancia recorrida.

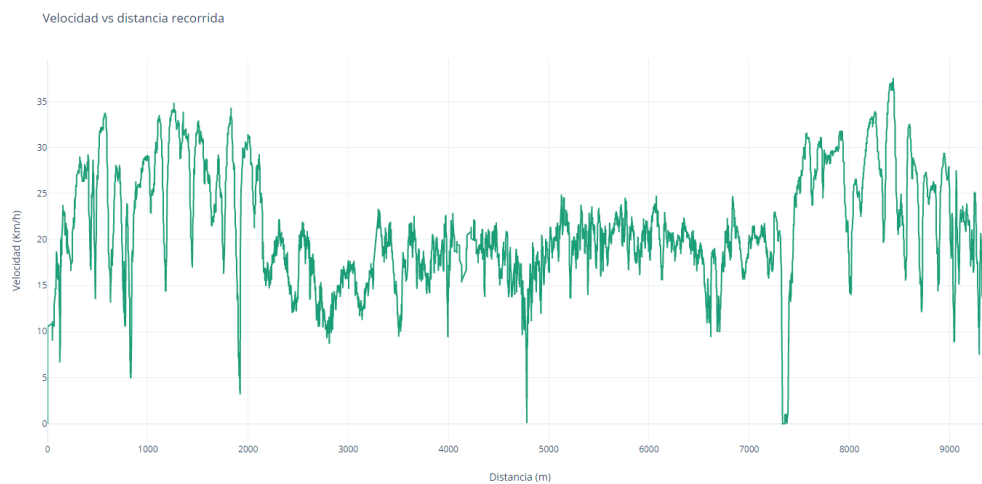


Figura 28. Velocidad frente a la distancia recorrida.



Como podemos observar en el primer gráfico, la temperatura llega a su máximo cuando el monociclo alcanza las cotas más altas del camino. En esta primera etapa en la que se está subiendo hacia la cima, la velocidad vemos como es bastante alta (35 Km/h) y aun así la temperatura no supera los 40°C. Cuando encaramos el mayor desnivel del camino, la velocidad se reduce a unos 20 km/h, pero la temperatura sigue elevándose. Una vez llegamos a la cúspide, la temperatura también lo hace. A medida que bajamos el desnivel, la velocidad podemos ver como se mantiene sobre los 20 km/h, sin embargo, no se produce un decremento de la temperatura como cabría esperar.



Capítulo II.

2.1. Marco teórico.

En el marco teórico se va a desarrollar los fundamentos que se usan para llevar a cabo la simulación. Por un lado, tenemos las ecuaciones de Navier-Stokes que son las que definen el comportamiento del flujo. Estas nos van a servir para cuantificar las características del movimiento del aire en el volumen fluido de interés. Si nuestro sistema de referencia fuese fijo solo tendríamos esa formulación, sin embargo, al tener varias partes móviles, tenemos que usar un marco de referencia múltiple (MRF).

Para concluir, se introducirá también el método de volúmenes finitos que es el método numérico al que se va a recurrir para resolver las ecuaciones propuestas.

2.1.1. Nomenclatura y notación.

Tabla 1. Nomenclatura y notación

Símbolo	Significado
V_f	Volumen fluido
ρ	Densidad
t	Tiempo
ϕ	Magnitud fluida
$\vec{f}_m$	Fuerzas másicas
$\vec{\tau}$	Esfuerzos en la superficie
$\vec{v}$	Vector velocidad
$\vec{A}$	Vector genérico
$\vec{\Omega}$	Vector velocidad angular
$\vec{u}$	Vector velocidad



$\vec{r}$	Vector posición
δ	Derivada parcial
D	Derivada total
ν	Viscosidad cinemática
$\nabla \cdot \mathbf{u}$	Divergencia del campo vectorial $\mathbf{u}$
∇	$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$; Operador gradiente
p	Presión
Γ	Coeficiente de difusión
Σf	Sumatorio de las superficies de la celdilla computacional
σ	Superficie
V	Volumen de la celdilla computacional
q_v	Término fuente
I	Inercial
R	Rotatorio

2.1.2. Sistema de referencia fijo.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) está regida por las ecuaciones de Navier-Stokes. Para demostrar esta afirmación vamos a partir de la base de que tenemos un líquido (en nuestro caso aire) en un volumen determinado.

Un flujo consta de tres ecuaciones fundamentales como son la conservación de la masa, la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la energía. Estas ecuaciones, al hacerlas diferenciales, se denominan las ecuaciones de Navier-Stokes. A continuación, se definirán cada las dos primeras ya que son las que van a resolverse numéricamente:



2.1.3. Ecuación de la conservación de la masa:

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{V_f(t)} \rho \delta V = 0$$

Ecuación 1. Ecuación de la conservación de la masa.

El término dentro de la integral denota la masa contenida en el volumen fluido.

Esta ecuación así escrita no es práctica. Para poder hacer uso de esta ecuación fácilmente aplicaremos a ella el Teorema del Transporte de Reynolds y el Teorema de Gauss. Los cuales son:

Teorema del Transporte de Reynolds:

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{V_f} \phi \delta V = \int_{V_f} \frac{\delta \phi}{\delta t} \delta V + \int_{\Sigma_f} \phi \vec{v} \cdot \vec{n} \delta \sigma$$

Ecuación 2. Teorema del Transporte de Reynolds.

Teorema de Gauss:

$$\int_{\Sigma_f} \phi \vec{v} \cdot \vec{n} \delta \sigma = \int_{V_f} \nabla \cdot (\phi \vec{v}) \delta V$$

Ecuación 3. Teorema de Gauss.

La ecuación de la conservación de la masa en forma diferencial quedaría como:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Ecuación 4. Ecuación de la conservación de la masa.



En este punto, debemos hacer dos consideraciones: en nuestro caso el flujo es incompresible ($\rho = \text{cte}$) y estacionario ($\delta/\delta t = 0$).

2.1.4. Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento:

Esta ecuación se obtiene a partir de la 2ª Ley de Newton y de aplicar como anteriormente el Teorema del Transporte de Reynolds y el Teorema de Gauss.

2ª Ley de Newton:

$$\frac{\delta}{\delta t} \int_{Vf(t)} \rho \vec{v} \delta V = \int_{\Sigma f(t)} \vec{\tau} \cdot \vec{n} \delta \sigma + \int_{Vf(t)} \rho \vec{f}_m \delta V$$

Aplicamos las ecuaciones del Teorema del Transporte de Reynolds y el Teorema de Gauss y nos queda:

$$\frac{\delta \rho \vec{v}}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f}_m$$

Ecuación 5. Ecuación cantidad de movimiento.

Esta es la ecuación de la cantidad de movimiento en formato diferencial conservativo que es el más usual para los métodos numéricos.

2.1.5. Sistema de referencia múltiple

Un marco de referencia múltiple (MRF) es una técnica de modelado simple, robusta y eficiente para simular un flujo rotacional. Un MRF supone que un volumen asignado tiene una velocidad de rotación constante y que sus límites son de revolución (en nuestro caso un cilindro que recubre la rueda del monociclo).

Esta técnica es semejante a llevar a cabo simulación rotacional y posteriormente evaluar los resultados desde el rotor dentro del MRF [16]. Para poder realizar esto, debemos incluir el término de coriolis en los términos fuertede la ecuación de la cantidad de movimiento, ya que



vamos a tener una aceleración relativa de nuestro objeto debido a nuestro sistema de referencia móvil.

La formulación que sigue este método es la ecuación de Navier-Stokes para un flujo incompresible y en régimen giratorio. El desarrollo, obtenido desde OpenFoam, es el siguiente [17]:

- Aceleración para un marco giratorio ($\vec{\Omega}$):

Para un vector general:

$$\left[\frac{d\vec{A}}{dt} \right]_I = \left[\frac{d\vec{A}}{dt} \right]_R + \vec{\Omega} \times \vec{A}$$

Para un vector de posición:

$$\left[\frac{d\vec{r}}{dt} \right]_I = \left[\frac{d\vec{r}}{dt} \right]_R + \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

$$\vec{u}_I = \vec{u}_R + \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

Expresamos la aceleración como:

$$\left[\frac{d\vec{u}_I}{dt} \right]_I = \left[\frac{d\vec{u}_I}{dt} \right]_R + \vec{\Omega} \times \vec{u}_I$$

$$\left[\frac{d\vec{u}_I}{dt} \right]_I = \left[\frac{d[\vec{u}_R + \vec{\Omega} \times \vec{r}]}{dt} \right]_R + \vec{\Omega} \times [\vec{u}_R + \vec{\Omega} \times \vec{r}]$$

$$\left[\frac{d\vec{u}_I}{dt} \right]_I = \left[\frac{d\vec{u}_R}{dt} \right]_R + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} + \vec{\Omega} \times \left[\frac{d\vec{r}}{dt} \right]_R + \vec{\Omega} \times \vec{u}_R + \vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

$$\left[\frac{d\vec{u}_I}{dt} \right]_I = \left[\frac{d\vec{u}_R}{dt} \right]_R + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} + 2\vec{\Omega} \times \vec{u}_R + \vec{\Omega} \times \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

Ecuación 6. Aceleración para un marco giratorio.

- Ecuaciones de Navier-Stokes en el marco inercial con velocidad absoluta. Asumimos viscosidad molecular constante.



$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{aligned} \frac{D\vec{u}_I}{Dt} &= -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \nu\nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I) \\ \nabla \cdot \vec{u}_I &= 0 \end{aligned} \right\} \\
 & \left\{ \begin{aligned} \frac{\delta\vec{u}_I}{\delta t} + \vec{u}_I \cdot \nabla \vec{u}_I &= -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \nu\nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I) \\ \nabla \cdot \vec{u}_I &= 0 \end{aligned} \right\} \\
 & \left\{ \begin{aligned} \frac{\delta\vec{u}_I}{\delta t} + \nabla(\vec{u}_I \otimes \vec{u}_I) - \underbrace{(\nabla \cdot \vec{u}_I)\vec{u}_I}_0 &= -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \nu\nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I) \\ \nabla \cdot \vec{u}_I &= 0 \end{aligned} \right\} \\
 & \boxed{\begin{aligned} \frac{\delta\vec{u}_I}{\delta t} + \nabla(\vec{u}_I \otimes \vec{u}_I) &= -\nabla\left(\frac{p}{\rho}\right) + \nu\nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I) \\ \nabla \cdot \vec{u}_I &= 0 \end{aligned}}
 \end{aligned}$$

Ecuación 7. Las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes en el marco inercial con viscosidad molecular constante

- Ecuaciones de Navier-Stokes en el marco relativo con velocidad relativa. Pongamos atención al lado izquierdo de la ecuación del momento (ecuación 7) teniendo en cuenta la ecuación 6 para el término de la aceleración:

$$\begin{aligned}
 \frac{D\vec{u}_I}{Dt} &= \frac{D\vec{u}_R}{Dt} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} x\vec{r} + 2\vec{\Omega}x\vec{u}_R + \vec{\Omega}x\vec{\Omega}x\vec{r} \\
 \frac{D\vec{u}_I}{Dt} &= \frac{\delta\vec{u}_R}{\delta t} + \vec{u}_R \cdot \nabla \vec{u}_R + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} x\vec{r} + 2\vec{\Omega}x\vec{u}_R + \vec{\Omega}x\vec{\Omega}x\vec{r} \\
 \frac{D\vec{u}_I}{Dt} &= \frac{\delta\vec{u}_R}{\delta t} + \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_R) + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} x\vec{r} + 2\vec{\Omega}x\vec{u}_R + \vec{\Omega}x\vec{\Omega}x\vec{r}
 \end{aligned}$$

Ya que $\nabla \cdot \vec{u}_R = \nabla \cdot \vec{u}_I = 0$

$$\nabla \cdot \vec{u}_R = \nabla \cdot [\vec{u}_R + \vec{\Omega}x\vec{r}] = \nabla \cdot \vec{u}_R + \underbrace{\nabla \cdot [\vec{\Omega}x\vec{r}]}_0 = \nabla \cdot \vec{u}_R = 0$$

$$\text{Además: } \nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I) = \nabla \cdot \nabla[\vec{u}_R + \vec{\Omega}x\vec{r}] = \nabla \cdot \nabla(\vec{u}_R) + \underbrace{\nabla \cdot \nabla[\vec{\Omega}x\vec{r}]}_0$$



$$\nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I) = \nabla \cdot \nabla(\vec{u}_R)$$

Con todo esto, la ecuación 8 se puede escribir como:

$$\frac{\delta \vec{\Omega}}{\delta t} + \frac{\delta \vec{u}_R}{\delta t} x \vec{r} + \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_R) + 2\vec{\Omega} x \vec{u}_R + \vec{\Omega} x \vec{\Omega} x \vec{r} = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nu \nabla \cdot \nabla(\vec{u}_R)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_R = 0$$

Ecuación 8. Ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles en el marco giratorio, en términos de velocidades de rotación.

Esta ecuación representa las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible en un marco giratorio en términos de la velocidad de rotación.

Ecuaciones de Navier-Stokes en el marco relativo con velocidad absoluta. Desarrollamos la ecuación anterior de forma que la velocidad de convección sea la velocidad del marco inercial.

Desarrollamos el término $\nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_R)$:

$$\begin{aligned} \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_R) &= \nabla(\vec{u}_R \otimes [\vec{u}_I - \vec{\Omega} x \vec{r}]) \\ &= \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_R) - \nabla \cdot \vec{u}_R (\vec{\Omega} x \vec{r}) - \vec{u}_R \cdot \nabla(\vec{\Omega} x \vec{r}) \\ &= \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_R) - \vec{\Omega} x \vec{u}_R \end{aligned}$$

Reescribimos el término estable de la ecuación 5:

$$\begin{aligned} \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_R) + 2\vec{\Omega} x \vec{u}_R + \vec{\Omega} x \vec{\Omega} x \vec{r} &= \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_I) - \vec{\Omega} x \vec{u}_R + 2\vec{\Omega} x \vec{u}_R + \vec{\Omega} x \vec{\Omega} x \vec{r} \\ &= \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_I) + \vec{\Omega} x \vec{u}_R + \vec{\Omega} x \vec{\Omega} x \vec{r} \\ &= \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_I) + \vec{\Omega} x \vec{u}_I \end{aligned}$$

Agrupamos y sustituimos en la ecuación 8, que se nos queda como:

$$\frac{\delta \vec{u}_R}{\delta t} + \frac{\delta \vec{\Omega}}{\delta t} x \vec{r} + \nabla(\vec{u}_R \otimes \vec{u}_I) + \vec{\Omega} x \vec{u}_I = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nu \nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_R = 0$$

Ecuación 9. Ecuación 8 escrita en términos de la velocidad absoluta.



2.1.6. Método de los volúmenes finitos.

De cara a llevar a cabo la simulación, debemos escoger un método de resolución, es decir, discretizar las ecuaciones. En este punto tenemos varias opciones como pueden ser el método en diferencias finitas, el método de volúmenes finitos y el método en elementos finitos.

El método de volúmenes finitos es el que vamos a usar. En este caso las ecuaciones que se estudian no son las que están en formulación diferencial si no que tenemos que quedarnos con la integral:

$$\int_{V_f} \frac{\delta(\rho\phi)}{\delta t} dV + \int_{\Sigma_f} \left(\rho U_i \phi - \Gamma \frac{\delta\phi}{\delta x_i} \right) \cdot n_i d\sigma = \int_V q_v dV$$

Ecuación 10. Ecuaciones de Navier-Stokes en formato integral.

La finalidad de este método es discretizar la ecuación de transporte escalar. Para ello tenemos que tener en cuenta el centroide y los límites de cada cara de la celdilla computacional. Las caras no tienen por qué ser planas y la malla puede ser estructurada y no estructurada. Las ecuaciones se resuelven para cada centroide. Un ejemplo de celdillas computacionales es el siguiente:

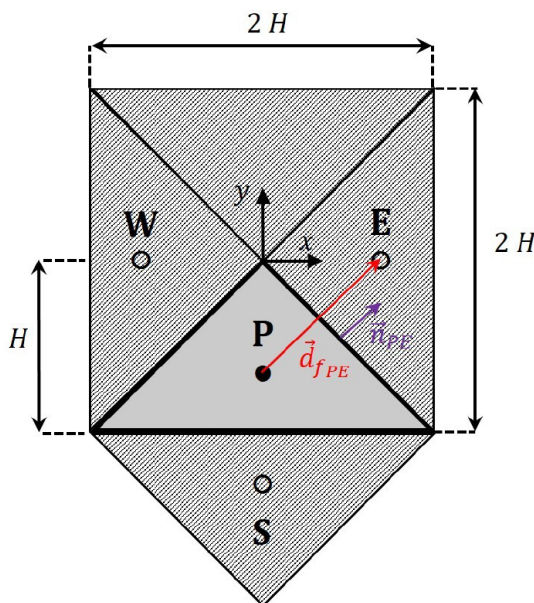


Figura 29. Malla estructurada.

Como podemos observar, la malla es una malla bidimensional (Figura 29), aunque, en el caso de nuestra malla real, esta es tridimensional.

Otro punto a tener en cuenta es el ángulo de no ortogonalidad, el cual es el definido por el vector que une los centroides de dos caras ($\vec{d}_{fPE}$ en este caso) y la perpendicular a la frontera entre ambas caras ($\vec{n}_{PE}$). Si este



ángulo es 0 (vectores paralelos) quiere decir que la malla es ortogonal. Por otra parte, si este vector es menor de 30° , la malla es muy buena, pero, por el contrario, si la malla es mayor de 60° , la malla es mala.

Consideraciones al usar este método:

- La simulación es más rápida porque se disminuyen el número de incógnitas en comparación con los otros métodos.
- Cuantas más caras tenga la celda, más precisas serán las integrales de superficie.
- Siempre hay que hacer mínimo 2 mallas para refinar y mejorar el resultado.
- Hacer la malla más fina en las partes que más interese y más basta en el resto.



2.2. Metodología:

Las etapas que se han seguido para llevar a cabo este proyecto son enumeradas a continuación:

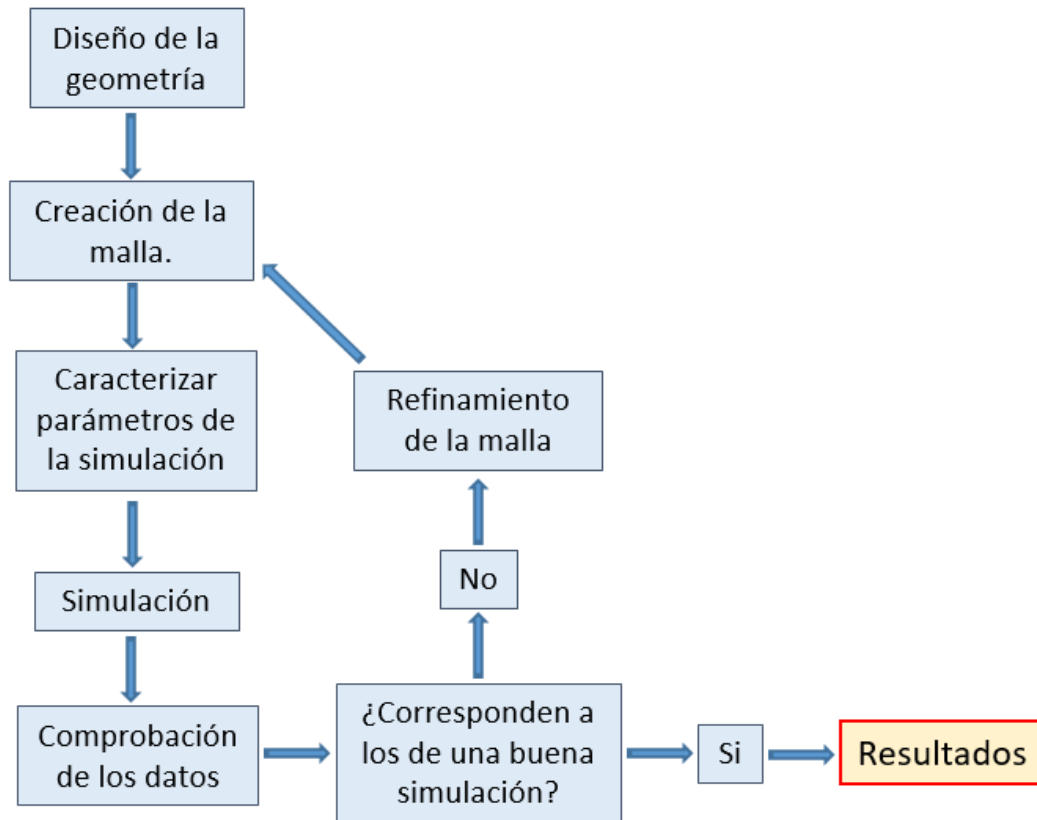


Figura 30. Etapas para realizar una simulación numérica

2.2.1. Diseño de la geometría.

- I. La geometría de nuestro modelo Kingsong KS-18L fue obtenida desde internet en formato CATPart (formato para Catia). En la siguiente imagen se puede visualizar la geometría del monociclo:

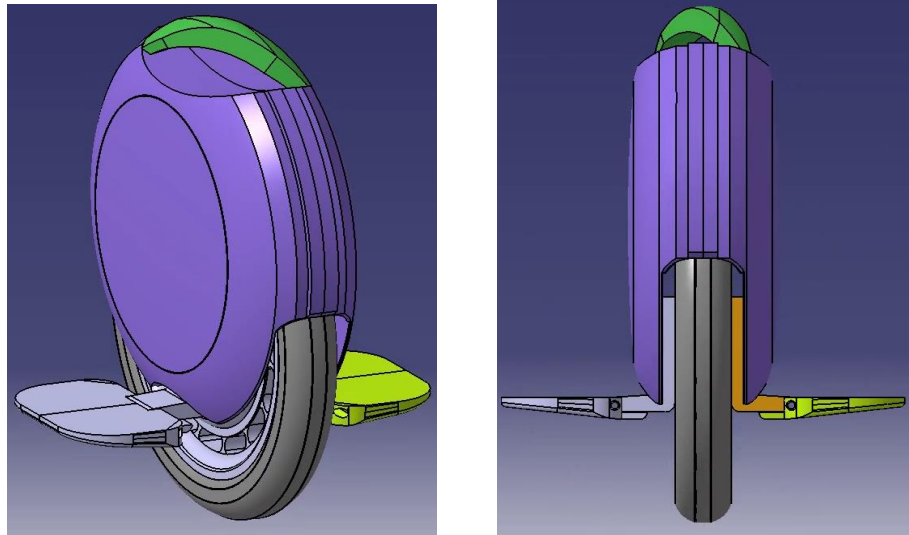


Figura 31. Geometría monociclo Kingsong KS-18L.

- II. Con el fin de poder llevar la geometría a OpenFoam, el siguiente paso fue usar el programa Blender para agrupar todas las partes en solo dos. Por una parte, tendríamos la zona móvil (Figura 32) donde estarían las partes que están en rotación y, por otra parte, las que están estáticas (

Figura 32. Conjunto móvil.

Figura 33. Conjunto estático.:



Figura 32. Conjunto móvil.

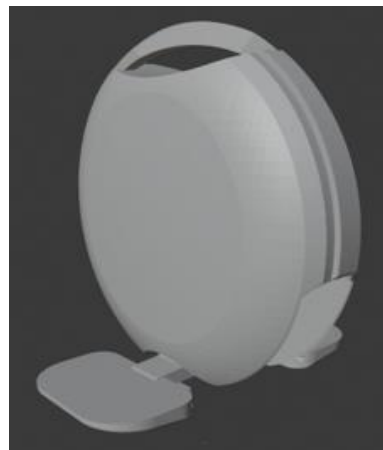


Figura 33. Conjunto estático.



- III. Una vez agrupadas, se guardan en formato STL, que es el usado para poder trabajar con objetos 3D en nuestro programa de CFD.
- IV. A fin de poder llevar a cabo nuestra simulación, necesitamos usar OpenFoam, para lo cual, el siguiente paso fue instalar VirtualBox (Figura 34). Este es un potente software que nos permite manejar Linux (que es más recomendable y estable que Windows al realizar simulaciones CFD). Una vez instalado, se crea una máquina virtual a partir de una imagen ISO obtenida desde internet, esta contiene Ubuntu y OpenFoam.

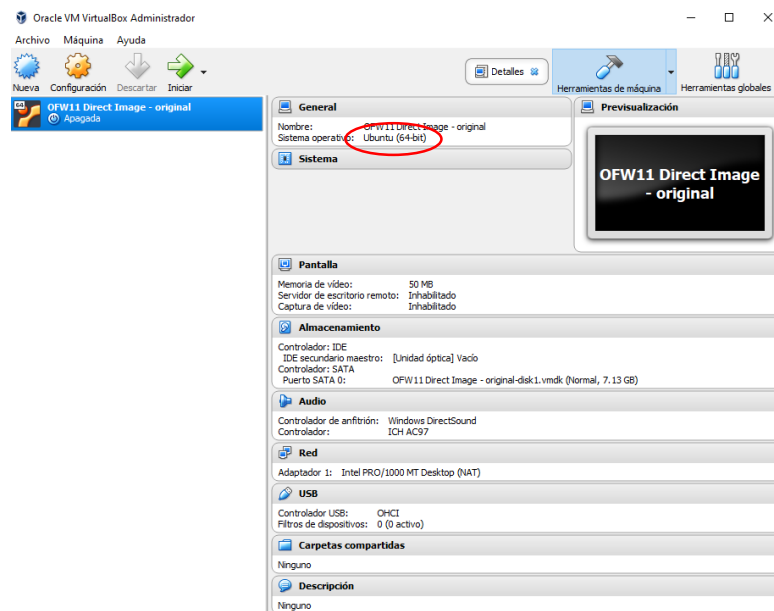


Figura 34. Interfaz Oracle VM VirtualBox.

- V. Acto seguido, procedemos a ejecutar HELYX-OS. Se cargan las geometrías mencionadas anteriormente y se procede a crear la malla para llevar a cabo la simulación.



2.2.2. Creación de la malla.

- VI. Se han de generar un mínimo de dos mallas con el fin de hacer la simulación final lo más realista posible. La primera malla será una malla de muestra para hacernos una idea de los resultados esperados y la segunda se hará para solucionar todos los problemas que se observen en la primera.
- VII. Creamos la malla de fondo. Esto es crear un dominio computacional que va a contener nuestra geometría y al cual se le van a dar las condiciones de contorno propias de un túnel de viento (Figura 35).

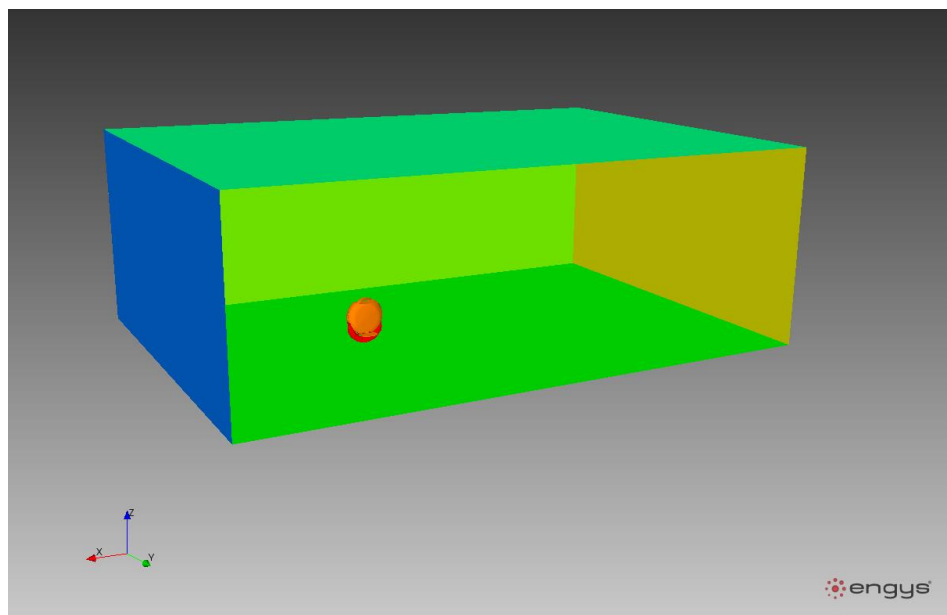


Figura 35. Malla de fondo.

En este caso para crear el cajón nos hemos apoyado en un estudio ya realizado sobre una rueda de bicicleta. Para nuestro caso, el diámetro de la rueda es de 50 cm. Las dimensiones de la malla serían las mostradas en la siguiente figura:

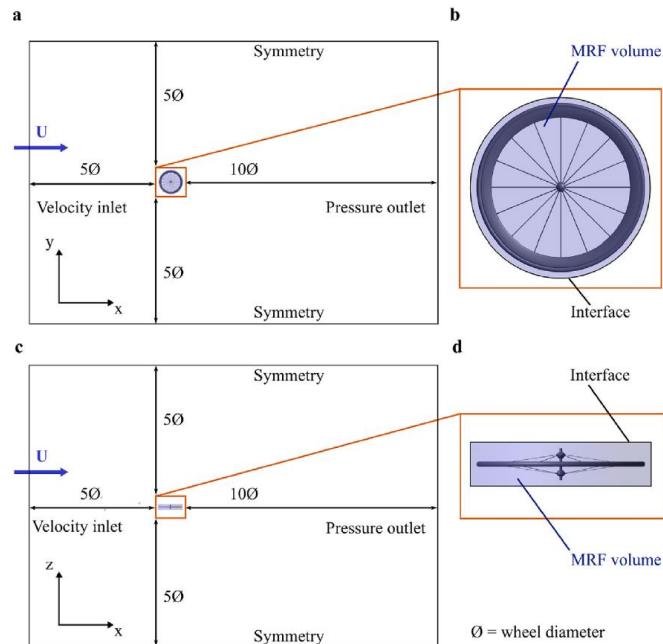


Figura 36. Dimensiones de la malla de fondo. [6]

- VIII. El siguiente paso es dividir la malla de fondo (Figura 37) de tal manera que, al menos, un eje de la malla debe cortar nuestra geometría STL.

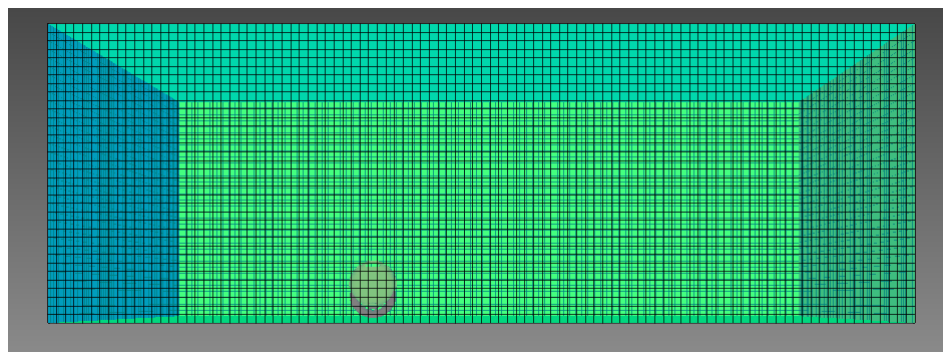


Figura 37. Malla de fondo dividida.

- IX. Una vez tenemos las primeras divisiones de la malla, extraemos los ejes de la superficie de la geometría para que, al mallar cerca de estos, los hexaedros de la malla se ajusten y la definan mejor.
- X. Accediendo a los archivos que se han creado de esta primera simulación, se creó posteriormente una geometría que contiene a la geometría móvil para que el programa la reconozca como una entidad en rotación. Para ello la carpeta “constant” (dentro de nuestro caso) se creará el archivo “MRFProperties” (Figura 38) y se le darán las condiciones de contorno que se necesiten en cada caso de velocidad angular.



```

/*
rotorDisk_mrf
{
    type MRFSource;
    active true;
    selectionMode cellZone;
    cellZone rotorDisk;
    MRFSourceCoeffs
    {
        origin (0.0 0.0 0.245);
        axis (0.0 1.0 0.0);
        omega constant 11.3;
    }
}

*/

MRF1
{
    cellZone rotorDisk;
    active yes;

    // Fixed patches (by default they 'move' with the MRF zone)
    nonRotatingPatches (ffminx ffmaxx ffiny ffiny ffinz ffinz exteriorbueno);

    origin (0.0 0.245);
    axis (0 1 0);
    omega constant 11.3;
}

```

Figura 38. Contenido del archivo “MRFProperties”

- XI. Finalmente, una vez se tienen todas las geometrías definidas, se procede a refinar la malla cerca de superficie sólida. Se adoptó un refinamiento de 2 o 3 (Figura 39), esto quiere decir que cada hexaedro se divide en 4 hexaedros a su vez en cada nivel de refinamiento, por lo que, cerca de la geometría, un hexaedro se dividirá en 4 (nivel 1), después cada subdivisión se dividirá en otros 4 (nivel 2) y para finalizar, cada hexaedro anterior vuelve a dividirse en otros 4 (nivel 3). Con esto, la geometría que define la malla es la siguiente (Figura 40):

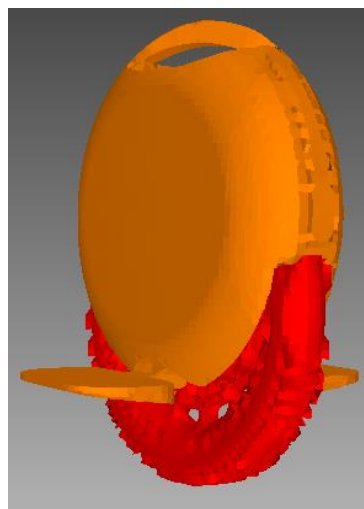


Figura 39. Refinado de nivel 2-3.

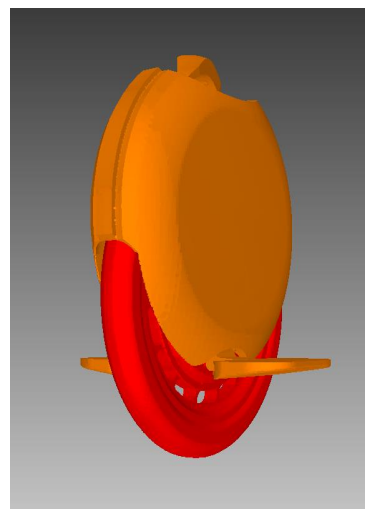


Figura 40. Refinado de nivel 4-5.



Se puede ver a simple vista que la aproximación no es la mejor, aunque nos sirve para hacernos una idea de los resultados que podemos esperar y para que la simulación sea rápida.

2.2.3. Caracterizar parámetros de la simulación.

- XII. Una vez que todo el mallado está creado, se procede a imponer las condiciones que tendrá la simulación. Se usó un modelo estacionario, con flujo incompresible y un número de Mach bajo.

El modelo de turbulencia fue el RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). Es el modelo menos complejo y más práctico. Se usa para flujos estacionarios o casi estacionarios. Este modelo funciona promediando las ecuaciones de flujo incompresible en el tiempo. Dentro del modelo RANS, se escogió $k-\omega$ SST, este es un híbrido entre el modelo $k-\omega$ y $k-\epsilon$. Una función de combinación, activa el modelo Wilcox ($k-\omega$) cerca de la pared y el modelo k -epsilon en la secuencia libre [18]. Esto asegura que se utilice el modelo apropiado en todo el campo de flujo:

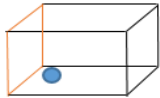
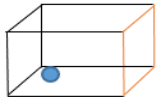
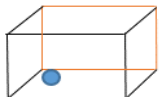
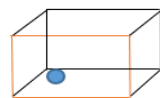
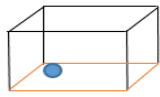
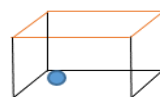
- El modelo k -omega es muy adecuado para simular el flujo en la subcapa viscosa.
- El modelo k -epsilon es ideal para predecir el comportamiento del flujo en regiones alejadas de la pared.

- XIII. Seguidamente, seleccionamos el material con el que se va a hacer la simulación. En nuestro caso aire con las características por defecto.

- XIV. Las condiciones de contorno son las que definen el flujo en cada pared de nuestra malla de fondo. Las condiciones de contorno usadas han sido:



Tabla 2. Condiciones de contorno.

PARED	TIPO DE PARED	CARACTERÍSTICAS	TURBULENCIA	ZONA
Entrada	Patch	Velocity: fixed value (-13.88 m/s) Pressure: zero gradient	By turbulence intensity and mixing length. Turbulence intensity: 0.01 Mixing length: 0.01	
Salida	Patch	Velocity: pressure inlet outlet velocity Pressure: fixed value (0.0)	Zero Gradient	
Lateral Izquierdo	Simmetry			
Lateral Derecho	Simmetry			
Suelo	Moving Wall	Velocity: fixed velocity (-13.88 m/s)		
Techo	Patch	Velocity: Freestream Pressure: Freestream Pressure (Pa)	Inflow fixed values: $K(m^2/s^2)$: 0.01 Ω (1/s): 0.1	

Donde:

- Patch: se usa para una condición que no contiene información geométrica ni topológica sobre la malla. Se usa por ejemplo en entrada y salida.
- Simmetry: planos de simetría.
- Fixed value: proporciona un valor fijo para una magnitud.
- Zero gradient: se aplica una condición de gradiente cero desde el campo interno del parche a las caras.



- Freestream: condición de flujo libre.
- Pressure inlet outlet velocity: Se aplica una condición de gradiente cero para el flujo de salida (según lo define el flujo). Para el flujo de entrada, la velocidad se obtiene de la componente normal de la cara de la celda interna.
- Moving Wall: pared en constante movimiento.

XV. Para proseguir con la preparación de la simulación, vamos a elegir los métodos numéricos que va a usar nuestro programa para resolver los distintos parámetros a estudiar. En este caso tendremos:

- U: Upwind 1^{er} orden.
- k: Bounded Upwind 1^{er} orden.
- Omega: Bounded Upwind 1^{er} orden.
- Laplaciano: corrección no ortogonal = 0.33

XVI. Uno de los puntos más importantes de la simulación son los residuales. Estos indican la variación entre el valor que arrojan dos iteraciones consecutivas de un parámetro determinado. Para tener una buena simulación, dicha diferencia debe ser lo más próxima a cero, por lo que, se fijó que para que se de convergencia los residuales deben estar entre 1×10^{-6} y 1×10^{-8} .

XVII. Para acabar con esta fase de ajuste de la simulación, se aumentó el número de iteraciones de esta para asegurarnos que llegan a converger los residuales. Los valores de inicio de la simulación fueron:

- U: fixed value (-13.88 m/s)
- p: fixed value ($0 \text{ m}^2/\text{s}^2$)



- k: fixed value ($0 \text{ m}^2/\text{s}^2$)
- Omega: fixed value (0.1 1/s)

2.2.4. Simulación.

XVIII. Una vez lo tenemos todo configurado, lanzamos la simulación y cuando veamos que los residuales son estables y muy próximos a los valores impuestos, la paramos y analizamos la situación.

A) Refinamiento de la malla.

XIX. Como se dijo anteriormente, esta primera simulación nos serviría para, de forma rápida, tener una idea de nuestros futuros resultados. A partir de ella se corregirían errores y se propondría una más elaborada. Con lo cual, a partir de aquí se explican los cambios que se hicieron, ya que el mayor problema que hubo fue que la malla no se ajustaba bien a la geometría y los valores salían distorsionados.

XX. Esta vez, para ajustar bien la malla, se refinaron aún más las partes más sensibles como son aristas o el interior del monociclo. Para ello se accede a la carpeta donde está creada nuestra simulación, buscamos la subcarpeta "system" y dentro de ella, el archivo SnappyHexMeshDict (SnappyHexMesh es el mallador automático que usa HELYX-OS). Una vez dentro, vamos a cambiar los parámetros de refinamiento a 4-5 (Figura 42) y comprobamos cómo queda la geometría (Figura 41):

```
);
refinementSurfaces
{
    exteriorbueno
    {
        level (4 5);
    }

    ruedabuena
    {
        level (4 5);
    }
}

refinementRegions
{
    cylinder
    {
        mode inside;
        levels ((1.0 4));
    }
}
}
```

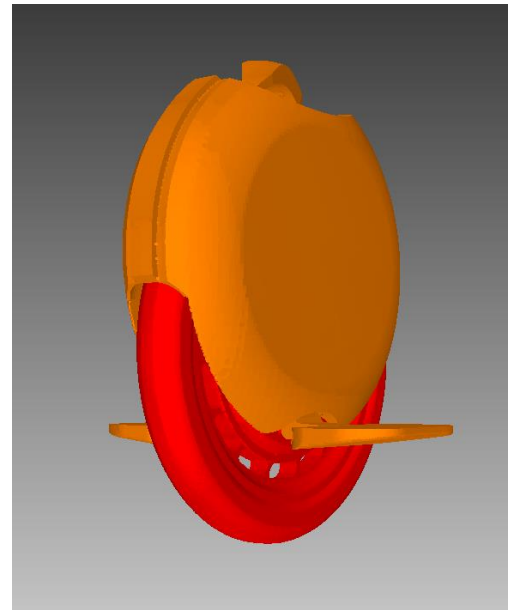


Figura 42. Nivel de refinamiento en el archivo SnappyHexMesh

Figura 41. Refinado de nivel 4-5

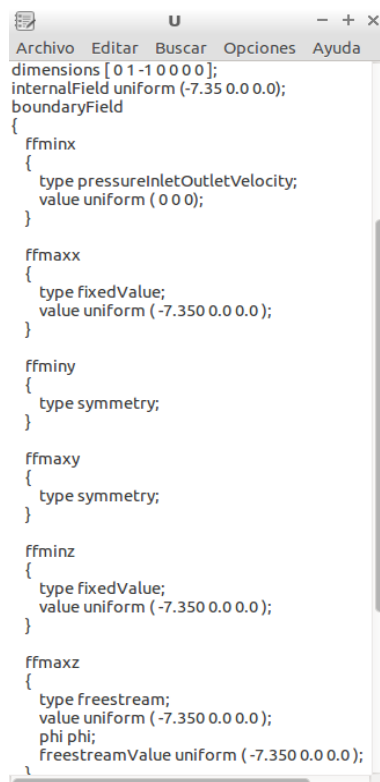
Podemos apreciar cómo se ajusta la nueva malla perfectamente a la geometría. Esta vez la simulación conllevará más tiempo de cálculo, pero como ya tenemos de referencia la primera y hemos corregido los errores, los resultados que arrojará esta vez serán muy confiables.

2.2.5. Segunda simulación.

- XXI. Con el fin de tener resultados en distintas condiciones de circulación del vehículo, se han realizado varias simulaciones a distintas velocidades. Esto nos ayudará a la hora de comparar los resultados para comprobar la dependencia de la aerodinámica del aire con la velocidad de circulación.
- XXII. Partimos de que tenemos una simulación creada completamente, a partir de ahora vamos a trabajar con ella de referencia y con la terminal cmd. Para crear las 10 simulaciones que se van a llevar a



cabo, basta con coger los archivos “0”, “constant” y “system” de la carpeta donde tenemos creada la primera simulación. Posteriormente, buscamos en la carpeta “0” el archivo “U” (Figura 43 y 44) y en “constant” el archivo “MRFProperties” (Figura 45 y 46). En ambos cambiamos la velocidad de las condiciones de contorno y la velocidad angular de la parte rotatoria por las que tengamos en cada caso.



```

Archivo  Editar  Buscar  Opciones  Ayuda
dimensions [0 1 -1 0 0 0];
internalField uniform (-7.35 0.0 0.0);
boundaryField
{
    ffminx
    {
        type pressureInletOutletVelocity;
        value uniform (0 0 0);
    }

    fffmaxx
    {
        type fixedValue;
        value uniform (-7.350 0.0 0.0);
    }

    fffminy
    {
        type symmetry;
    }

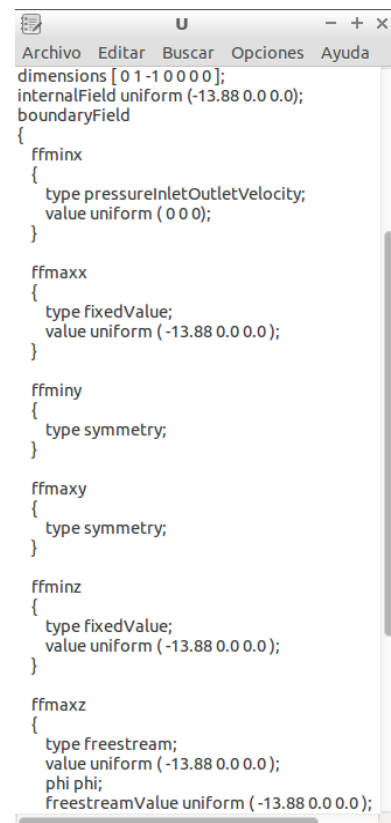
    fffmaxy
    {
        type symmetry;
    }

    fffminz
    {
        type fixedValue;
        value uniform (-7.350 0.0 0.0);
    }

    fffmaxz
    {
        type freestream;
        value uniform (-7.350 0.0 0.0);
        phi phi;
        freestreamValue uniform (-7.350 0.0 0.0);
    }
}

```

Figura 43. Archivo “U” de referencia.



```

Archivo  Editar  Buscar  Opciones  Ayuda
dimensions [0 1 -1 0 0 0];
internalField uniform (-13.88 0.0 0.0);
boundaryField
{
    ffminx
    {
        type pressureInletOutletVelocity;
        value uniform (0 0 0);
    }

    fffmaxx
    {
        type fixedValue;
        value uniform (-13.88 0.0 0.0);
    }

    fffminy
    {
        type symmetry;
    }

    fffmaxy
    {
        type symmetry;
    }

    fffminz
    {
        type fixedValue;
        value uniform (-13.88 0.0 0.0);
    }

    fffmaxz
    {
        type freestream;
        value uniform (-13.88 0.0 0.0);
        phi phi;
        freestreamValue uniform (-13.88 0.0 0.0);
    }
}

```

Figura 44. Archivo “U” modificado.

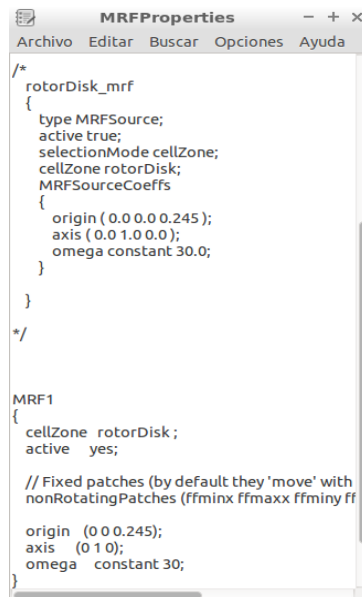


Figura 46. Archivo “MRFPProperties” de referencia

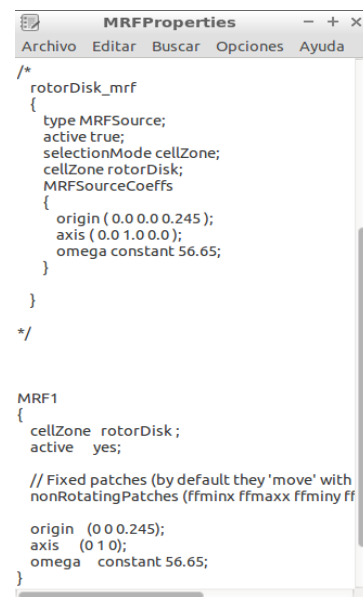


Figura 45. Archivo “MRFPProperties” modificado

XXIII. Ahora, desde la interfaz cmd, vamos a movernos de archivo en archivo haciendo uso de comandos como “cd [Directorio]” (para ir al directorio que necesites) y “cd ..” para salir del directorio. Cuando estemos en la carpeta del caso que vamos a estudiar, activamos OpenFoam con el comando “of30x” y escribimos lo siguiente: simpleFoam > log &. Esto significa que la simulación comienza, que todos los datos que va arrojando, como los residuales, los guarde en el archivo “log” y que todas las iteraciones que haga no las muestre en pantalla, sino que las realice en segundo plano.

2.2.6. Comprobación de la simulación.

XXIV. El siguiente paso es comprobar que la simulación va por buen camino. Para ello, vamos a ver una gráfica de los residuales para ver que han convergido (ver si han alcanzado un valor estable y próximo a 0) y también vamos a comprobar el valor de y^+ , un parámetro adimensional que nos indica si la malla está bien refinada.



Con el propósito de estudiar si los residuales han convergido correctamente, usando el comando “foamLog log” se dividen los datos del archivo log en subarchivos. Estos son leídos y graficados por un programa que he realizado en Matlab. Un ejemplo de los residuales descritos es el siguiente:

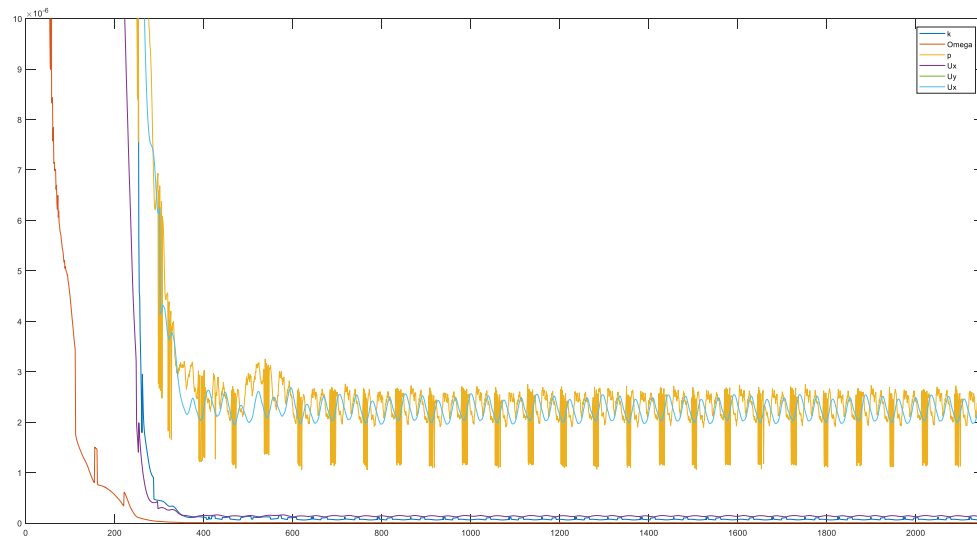


Figura 47. Gráfica de residuales.

Por otro lado, tenemos el valor de y^+ , vamos a calcularlo haciendo uso del comando ‘yPlus’ en la terminal. Para saber si nuestro valor corresponde al que buscamos, y^+ debe ser menor a 300. En la siguiente figura podremos ver los respectivos del valor de y^+ con los estados del flujo al que pertenece:

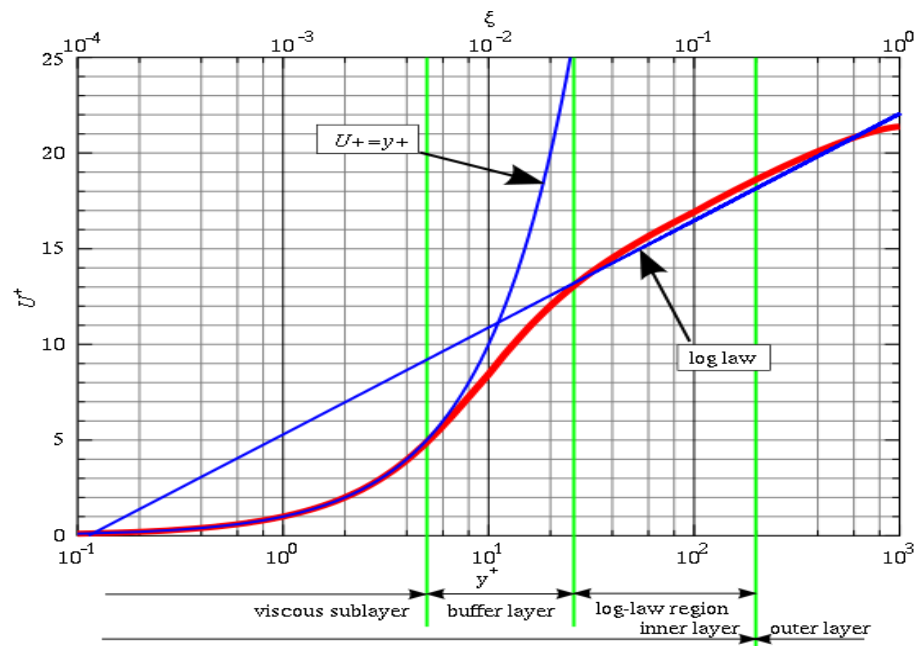


Figura 48. Gráfica de los valores de y^+ .

El valor de y^+ para el ejemplo con el que hemos calculado los residuales es el siguiente:

```
Patch 6 named exteriorbueno, wall-function nutUSpaldingWallFunction, y+ : min: 0.2803418121 max: 246.4076655 average: 49.90255325
Patch 7 named ruedabuena, wall-function nutUSpaldingWallFunction, y+ : min: 1.928615915 max: 131.8456742 average: 29.2382913
```

Figura 49. Resultados de y^+ .

Podemos afirmar que la simulación en este caso sería correcta y solo nos quedaría procesar los resultados obtenidos.



Capítulo III.

3.1. Resultados.

Para concluir este trabajo final de grado abordaremos la parte más crucial de la investigación. Ayudándonos de las simulaciones ya realizadas, podremos analizar la conexión de nuestro monociclo con el campo fluido, con el fin de dar respuesta a todas las cuestiones que se nos planteen relacionadas con la aerodinámica del Kingsong KS18-L.

3.1.1. Campo fluido.

Recordemos que nuestro fluido era aire, es decir, tenemos un gas que va a llenar todo el espacio disponible que haya en nuestro volumen fluido y se va a adaptar perfectamente a cualquier geometría que se inserte en este.

Por otro lado, sabemos que estamos usando un análisis matemático continuo, es decir, observamos el comportamiento del fluido a nivel macroscópico. Suponemos que el fluido ocupa de forma continua en cada instante de tiempo una región determinada del espacio y las variables fluidas, como la masa o la cantidad de movimiento, son funciones que dependen de la posición y el tiempo.

Teniendo en cuenta lo anterior, podemos definir nuestro campo fluido haciendo uso de la velocidad y la presión, las cuales son incógnitas de las variables fluidas mencionadas anteriormente. Para ello, ayudándonos de ParaView visualizaremos cómo se comportan en distintas situaciones.

Para empezar, tenemos la simulación realizada para una velocidad 5 km/h. Esta es la menor velocidad a la que se va a estudiar el caso. En contraposición, está la simulación realizada a 50 km/h, la cual es la máxima velocidad del monociclo.

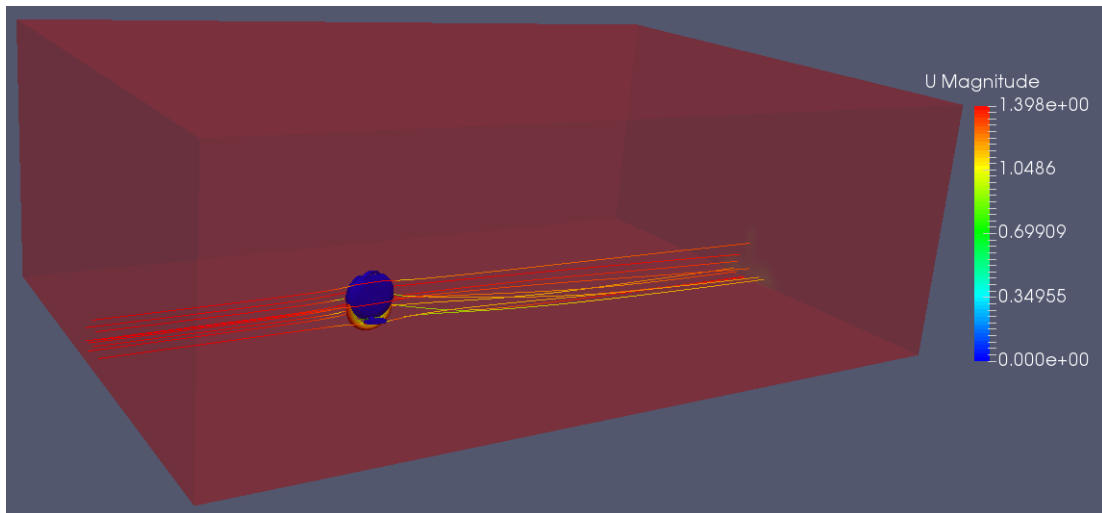


Figura 50. Velocidad de 5 km/h

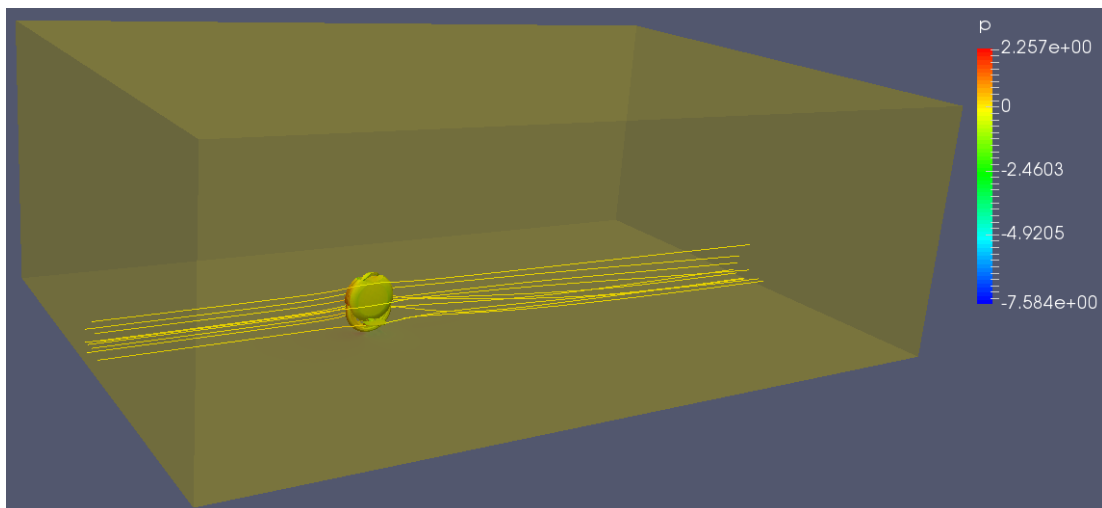


Figura 51. Presión para una velocidad de 5 km/h

Si tenemos en cuenta la figura 50, la velocidad de 5 km/h (1.4 m/s aproximadamente) es constante en casi todo el campo fluido excepto donde se encuentra con el monociclo. Para poder entender fácilmente cómo es el movimiento del aire en el interior de nuestro volumen, se han añadido líneas de corriente. Adicionalmente, contamos con la presión para esta velocidad (Figura 51), la cual al igual que la velocidad, es constante en casi todo el dominio computacional excepto en las inmediaciones de la geometría a estudiar.

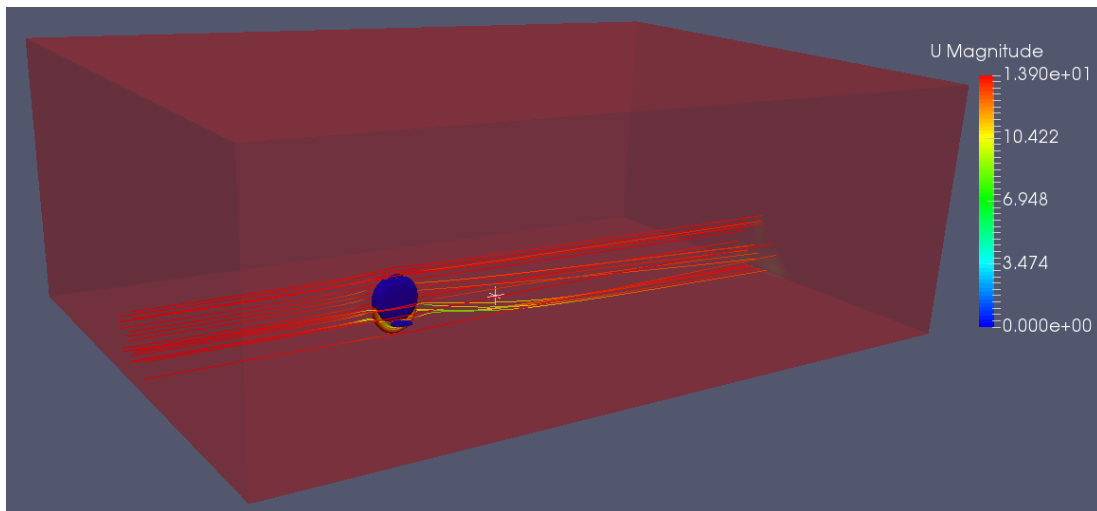


Figura 52. Velocidad de 50 km/h

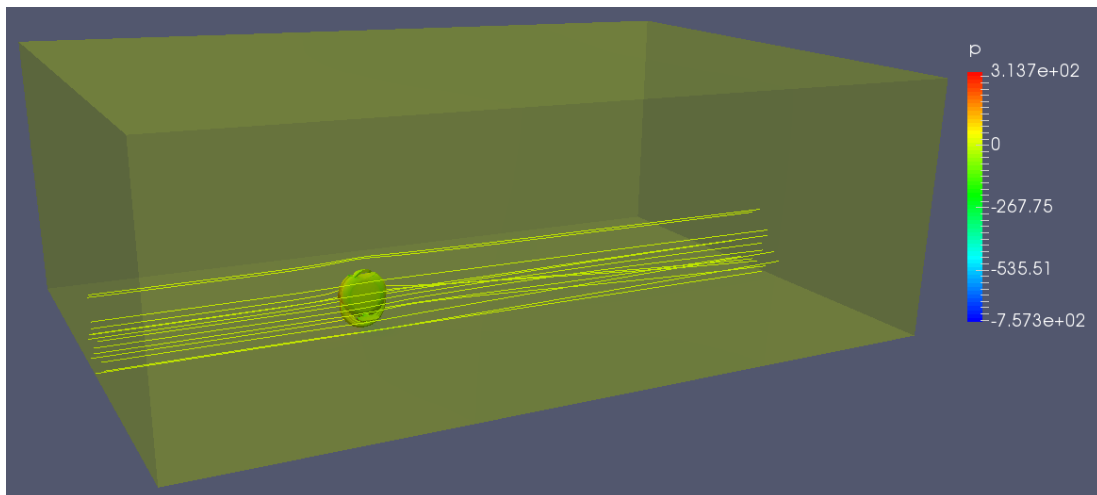


Figura 53. Presión para velocidad de 50 km/h.

Se puede visualizar en la figura 52 que nuestro campo fluido para 50 km/h (13.9 m/s aproximadamente) y la presión para este (Figura 53), se comportan similares al creado para 5 km/h. La diferencia, como es lógico, es que para una velocidad de 50 km/h la presión que va a soportar el cuerpo va a ser mayor que para 5 km/h, aunque esto ahora mismo no es relevante.

En conclusión, nuestro campo fluido queda totalmente definido para cada velocidad en la misma forma en que se configuró en el capítulo 2. Ahora podremos estudiar con seguridad los distintos aspectos que nos sean de interés de éste.

3.1.2. Análisis del campo velocidad

La primera y principal variable a estudiar va a ser la velocidad del flujo a través de nuestra geometría. Con este fin, se usarán varias figuras a distintas velocidades con la intención de compararlas y definir correctamente la aerodinámica de nuestro monociclo.

Para empezar, se va a mostrar cómo se comporta el aire al atravesar nuestra geometría completa. Con esto, podemos hacernos una idea de las zonas en que la velocidad es nula o casi nula y en las que la circulación es buena.

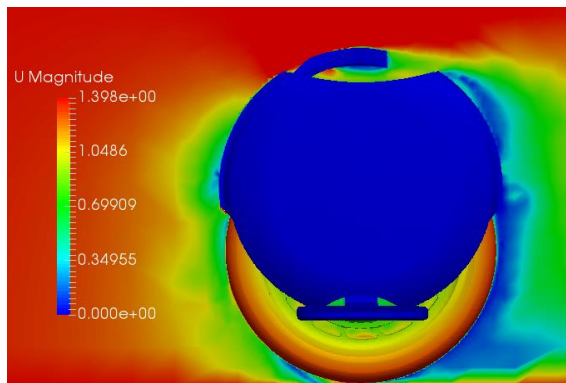


Figura 54. Simulación a 5 km/h

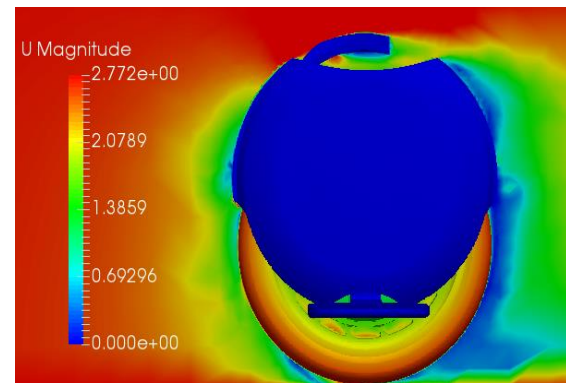


Figura 55. Simulación a 10 km/h

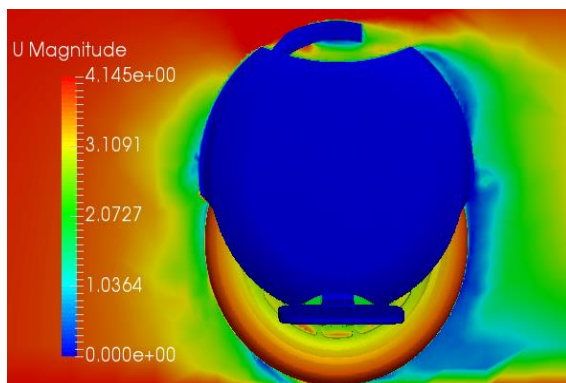


Figura 56. Simulación a 15 km/h

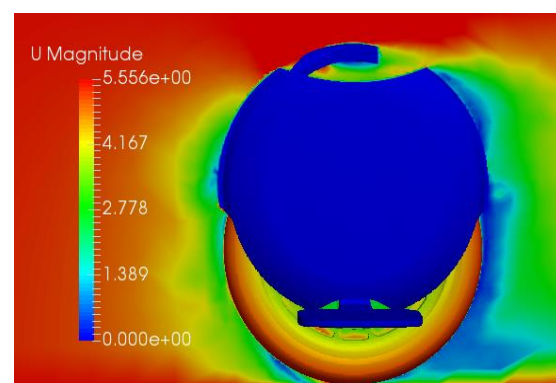


Figura 57. Simulación a 20 km/h

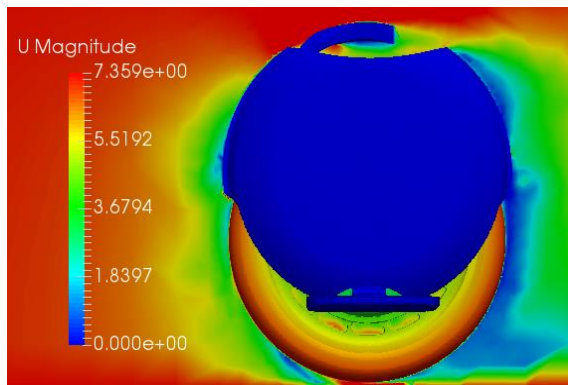


Figura 58. Simulación a 25 km/h

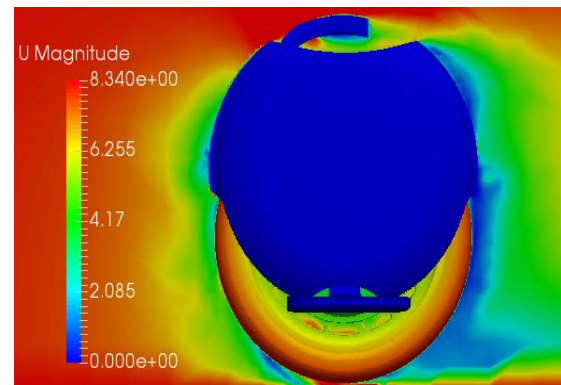


Figura 59. Simulación a 30 km/h

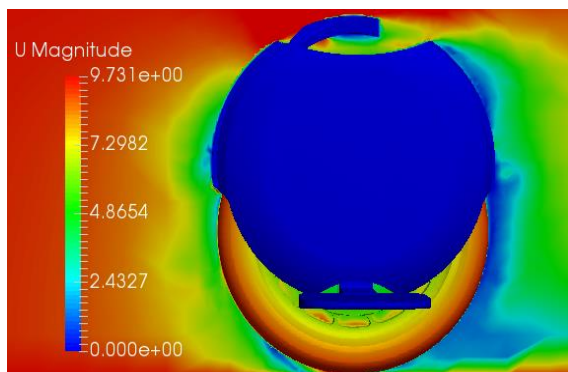


Figura 60. Simulación a 35 km/h

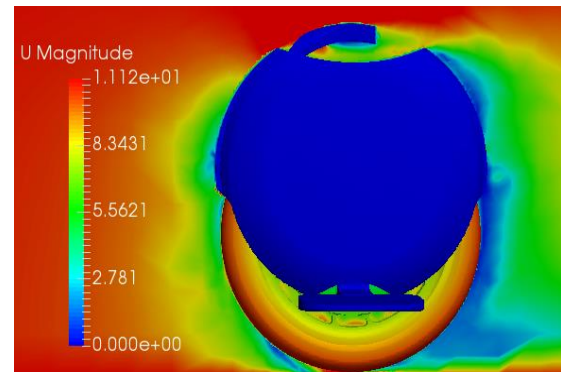


Figura 61. Simulación a 40 km/h

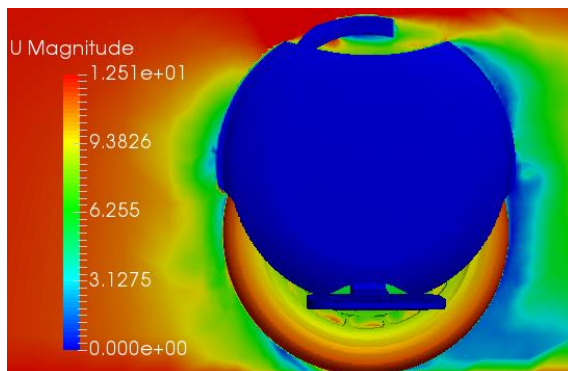


Figura 62. Simulación a 45 km/h

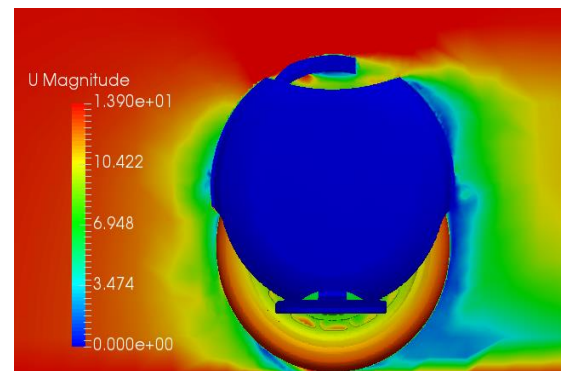


Figura 63. Simulación a 50 km/h

En las anteriores figuras (Figuras 54-63) podemos observar cómo se comporta la velocidad de nuestro flujo de aire cuando entra en contacto con el monociclo Kingsong KS-18L. Como aclaración añadiré que las velocidades que muestran las leyendas están m/s aunque, por facilidad de comprensión, en su descripción añadido la velocidad en km/h.

Nuestra parte rotatoria está girando con una velocidad angular constante de 30 rad/s para un caso intermedio (25 km/h), si tenemos en



cuenta el radio de nuestro monociclo (0.245 m), la velocidad tangencial de esta es de 7,35 m/s aproximadamente. Es por esto que la velocidad del neumático, del aire y del suelo son la misma.

Analizando cada una de las fotos podemos sacar algo en común, las zonas en que la velocidad disminuye hasta hacerse nula o prácticamente nula coinciden en todas y las zonas de máxima velocidad como son el suelo, la rueda o el flujo en sí, también son las mismas.

Como es de esperar, el aire al entrar en las inmediaciones del monociclo, debido a que hay zonas inmóviles, reduce su velocidad hasta que, si la viscosidad es alta (como en la superficie de la carcasa), esta sería nula.

A continuación, mostraré una figura con la estela completa de la velocidad del aire en nuestro dominio computacional (Figura 64). En ella se muestra como queda la velocidad del flujo instantes después de que nuestro objeto lo haya atravesado.

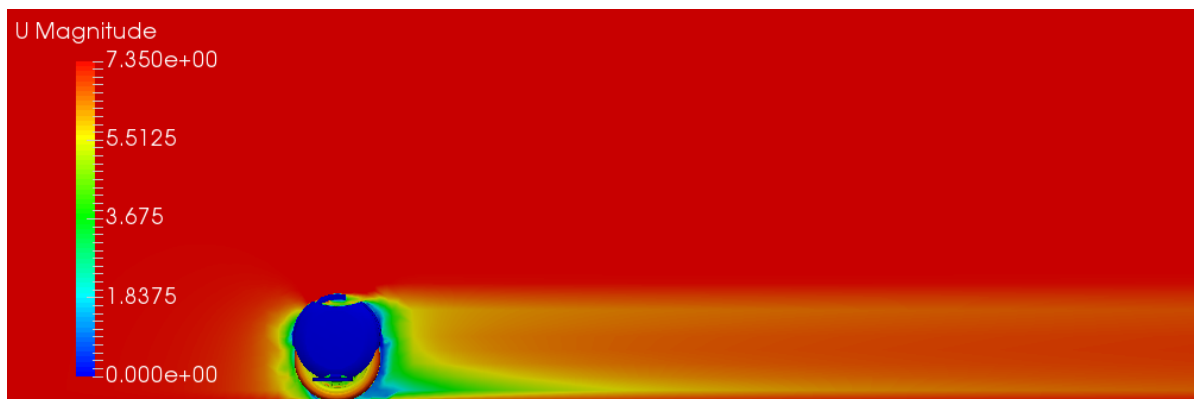


Figura 64. Estela completa de velocidad para el monociclo a 25 km/h

El siguiente caso que voy a estudiar va a ser de nuevo la velocidad que tiene nuestro flujo, pero en vez de analizar el conjunto completo, solo se visualizará la zona en rotación. Así podremos ver cómo se comporta el fluido entre la carcasa del monociclo y la rueda.

Tener en cuenta que las partes mostradas en gris son las que corresponderían a la parte inmóvil (carcasa, pedales, soporte, etc)

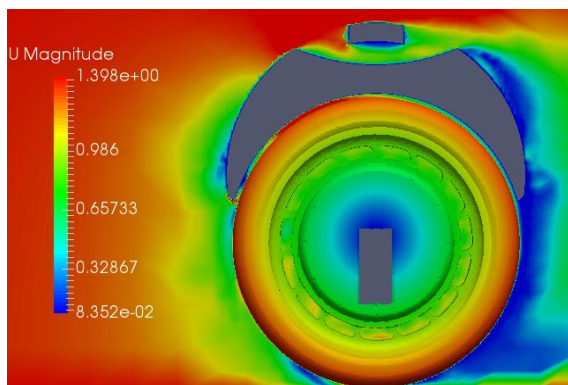


Figura 65. Rueda a 5 km/h

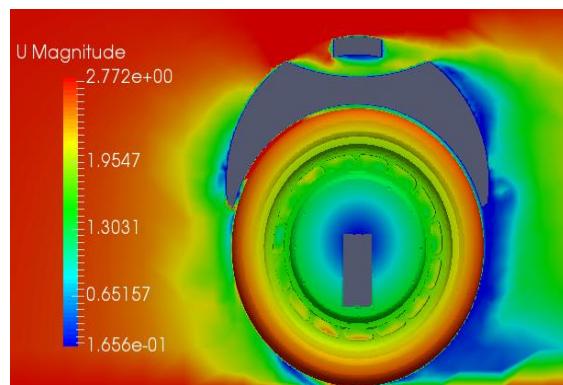


Figura 66. Rueda a 10 km/h

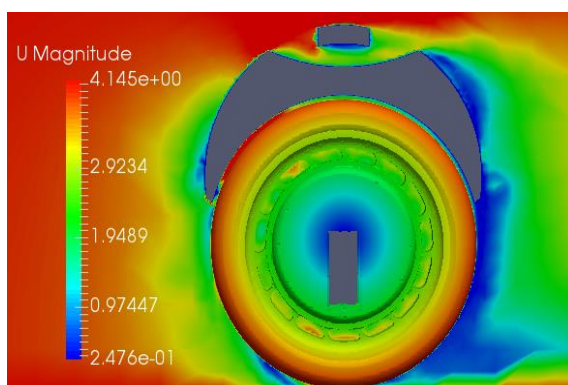


Figura 67. Rueda a 15 km/h

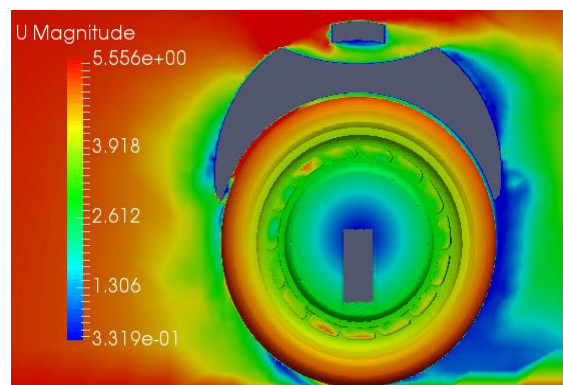


Figura 68. Rueda a 20 km/h

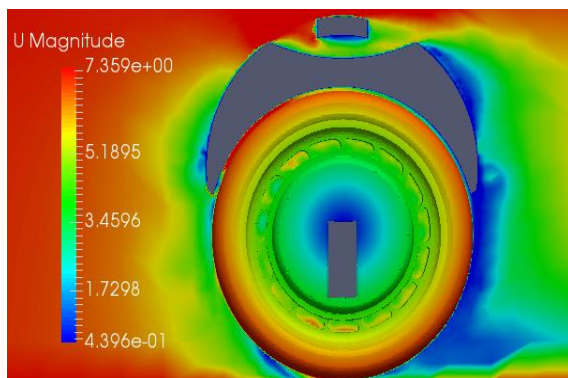


Figura 69. Rueda a 25 km/h

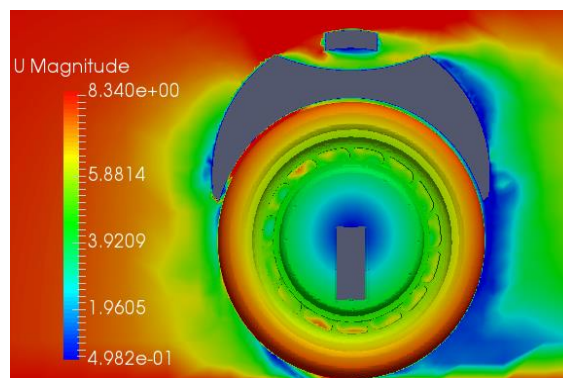


Figura 70. Rueda a 30 km/h

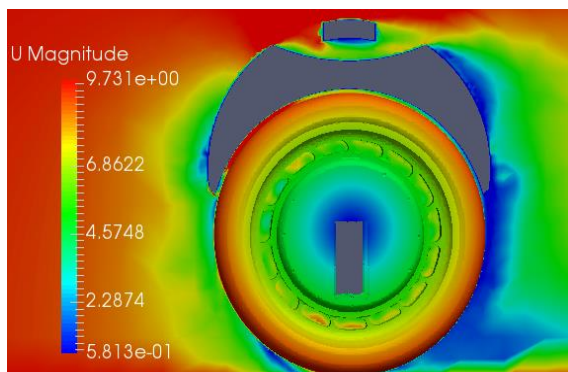


Figura 71. Rueda a 35 km/h

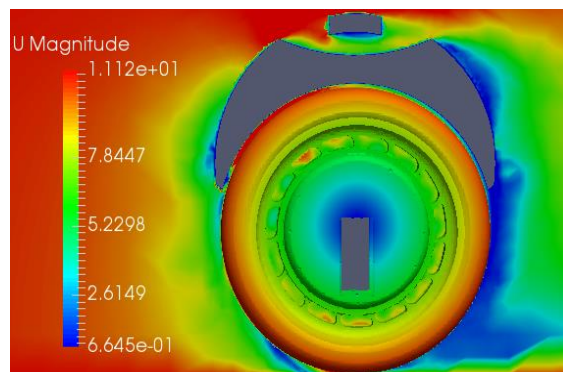


Figura 72. Rueda a 40 km/h

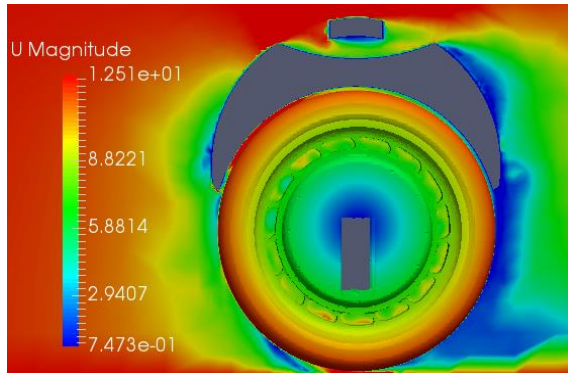


Figura 73. Rueda a 45 km/h

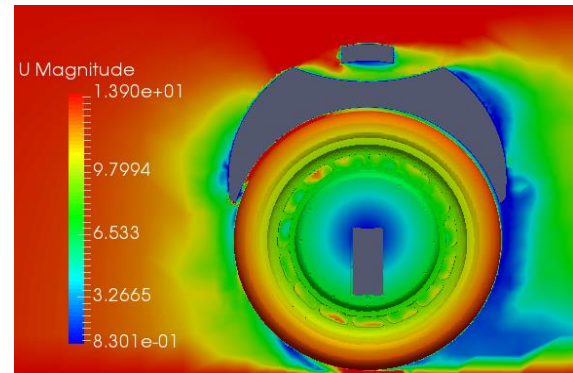


Figura 74. Rueda a 50 km/h

Una vez visualizado el comportamiento del fluido dentro de nuestra geometría (Figura 65-74) obtenemos una idea muy clara de lo que está sucediendo. El aire desde el mismo momento que está próximo al monociclo, empieza a disminuir su velocidad hasta que entra en contacto con la zona inmóvil del interior de éste y se vuelve nula.

Todo esto lleva a cuestionarnos cómo será la circulación del aire entre la parte móvil y la parte inmóvil para ver si hay algún problema de circulación debido a la geometría.

3.1.3. Análisis del flujo en el interior del monociclo.

Partiendo de los datos anteriormente presentados, vamos a centrarnos en el comportamiento que tiene el aire en la zona que existe entre la zona móvil (rueda, motor, llanta, etc) y la zona estática (pedales, soporte, carcasa, etc). Para esto, se mostrará antes que nada cómo es el campo velocidad en esta zona para posteriormente ir desglosando otras herramientas que nos sean de interés.

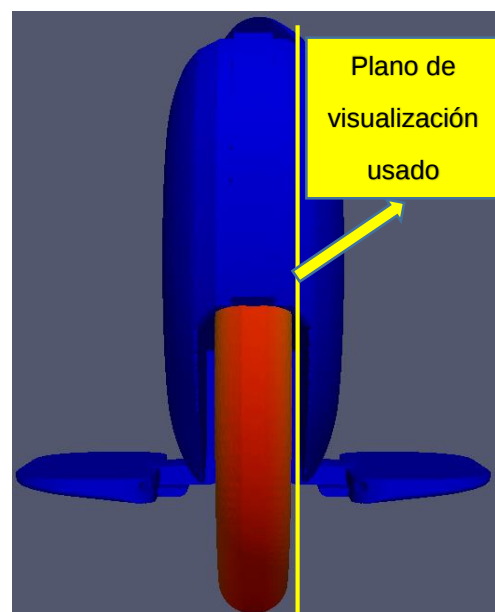


Figura 75. Plano de visualización.

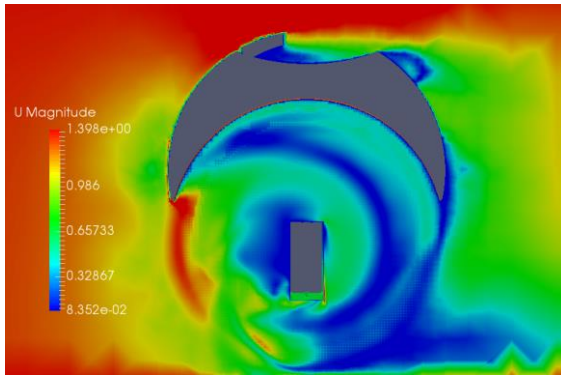


Figura 76. Flujo interior a 5 km/h.

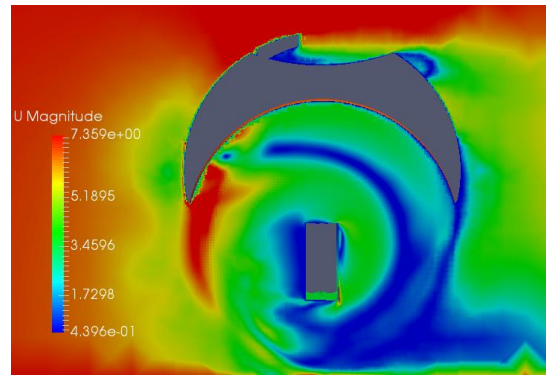


Figura 77. Flujo interior a 25 km/h.

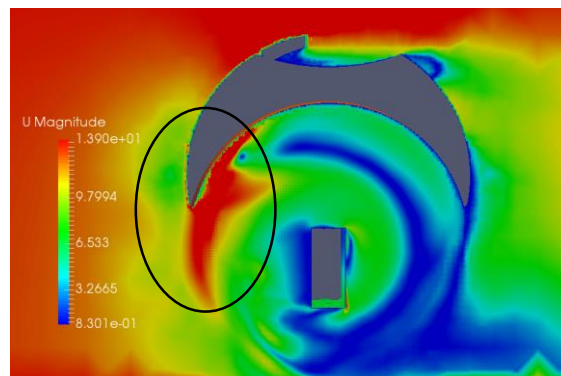


Figura 78. Flujo interior a 50 km/h.

En estas figuras se puede observar como al entrar el aire en el interior del cuerpo, éste lo hace con máxima velocidad, esta zona es la señalada en negro en la figura 78. Conforme el flujo atraviesa el cuerpo, esta velocidad comienza a disminuir hasta llegar a ser nula en gran parte.

El análisis se ha hecho con las velocidades 5, 25 y 50 km/h. Se aprecia que, aunque a más velocidad, más grande es la zona con aire a máxima velocidad, una vez en el interior siempre ocurre el mismo suceso, el flujo tiende a estancarse. Esto supone un problema de cara a la evaluar la aerodinámica interna ya que nos está indicando que el flujo experimenta alguna incidencia no deseada en esta región.

Para definir adecuadamente el flujo en esta región particular, podemos ayudarnos de las líneas de corriente, los vectores de velocidad y la visualización del campo integral de convolución de línea (complemento Surface LIC) que nos ayudará a entender los patrones de las líneas de flujo. Aplicaremos estas técnicas para las mismas 3 velocidades anteriormente mencionadas.

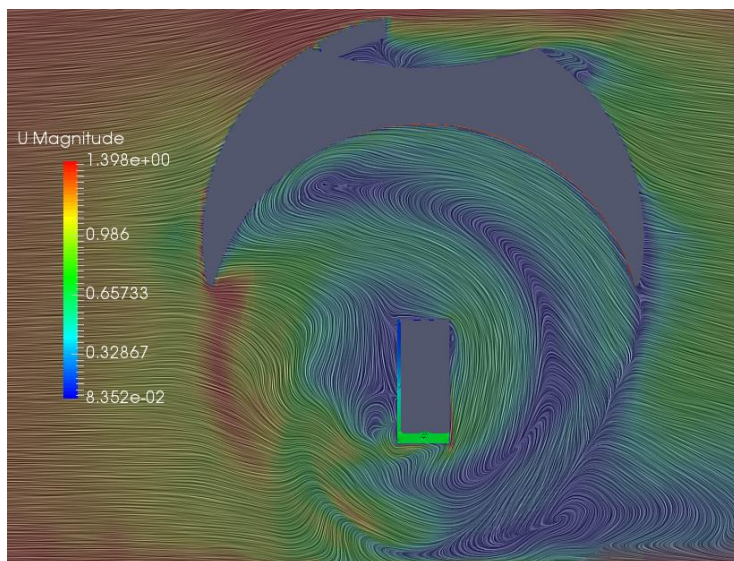


Figura 79. Surface LIC para velocidad de 5 km/h

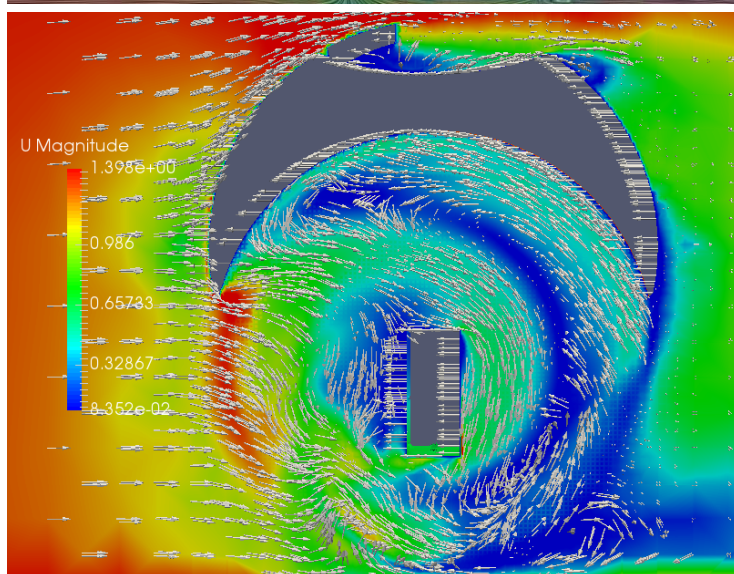


Figura 80. Vectores velocidad a 5 km/h

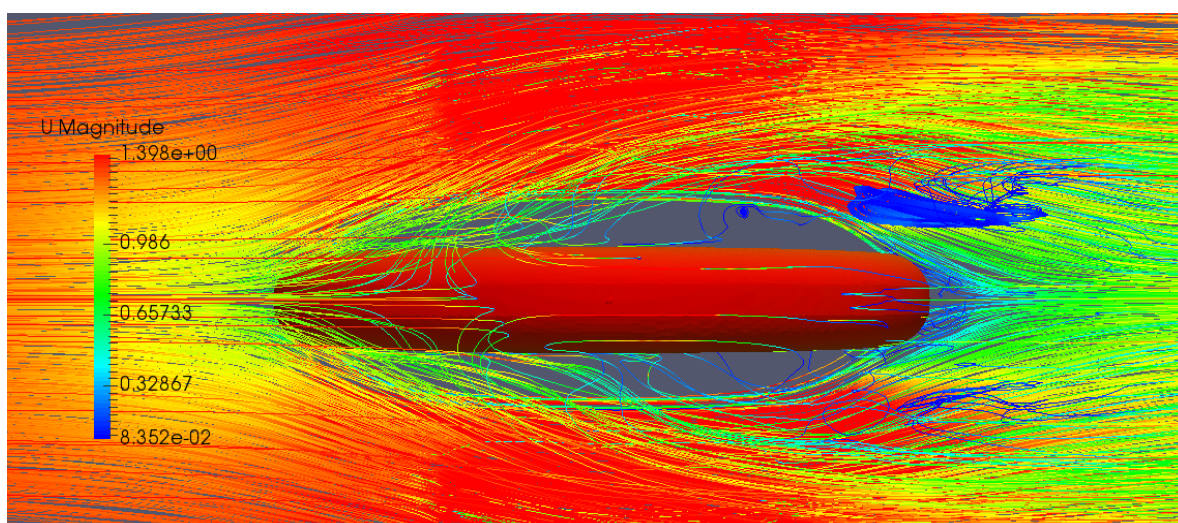


Figura 81. Líneas de corriente a 5 km/h para la parte rotatoria del Kingsong KS-18L.

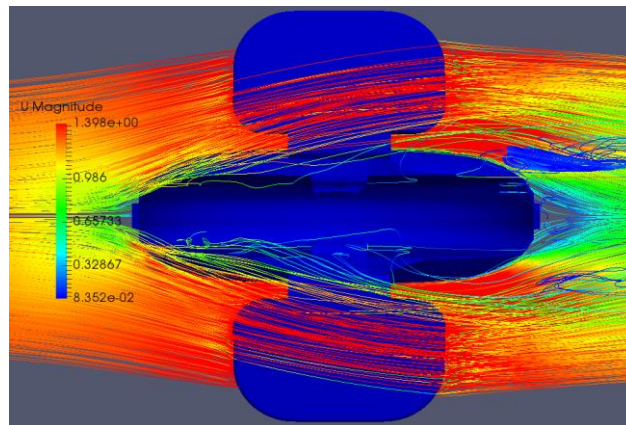
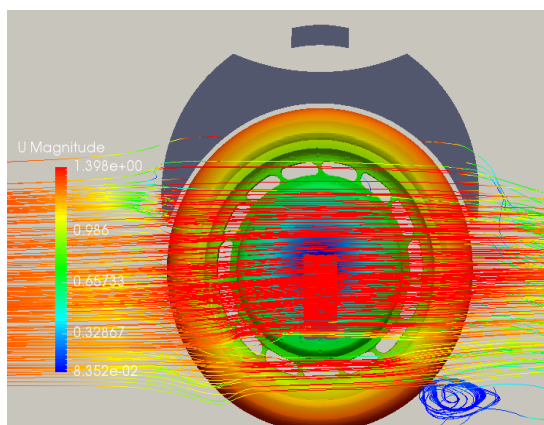


Figura 82. Líneas de corriente a 5 km/h. Figura 83. Líneas de corriente para parte estática.

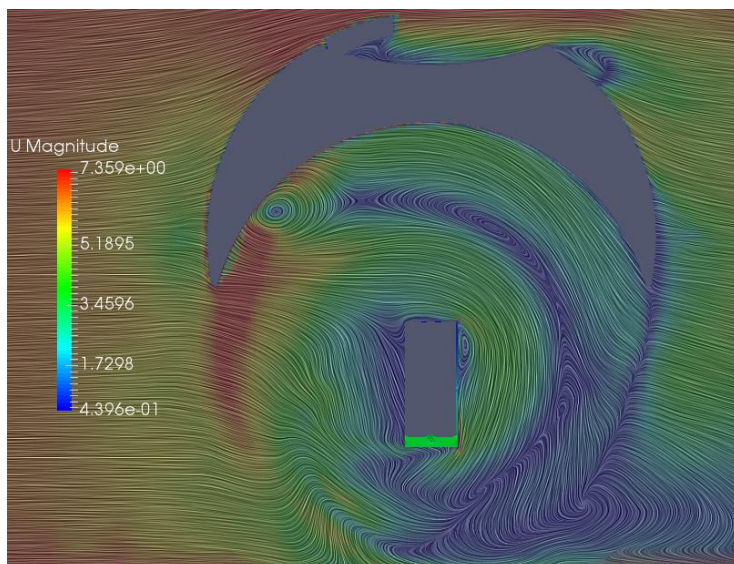


Figura 84. Surface LIC para velocidad de 25 km/h

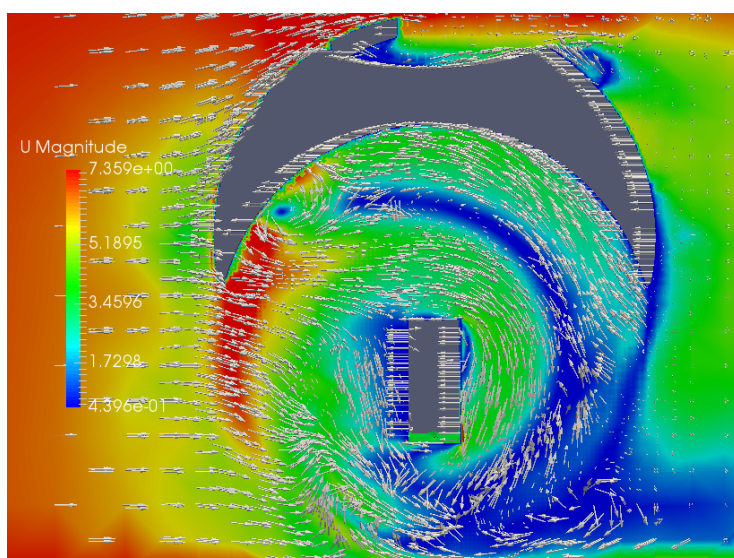


Figura 85. Vectores velocidad a 25 km/h

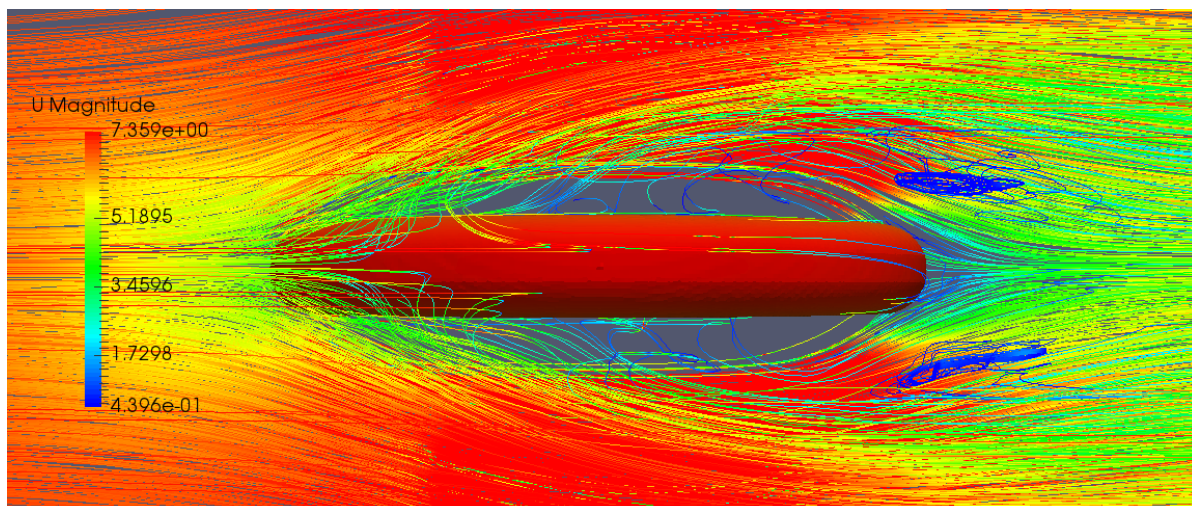


Figura 86. Líneas de corriente a 25 km/h para la parte rotatoria del Kingsong KS-18L

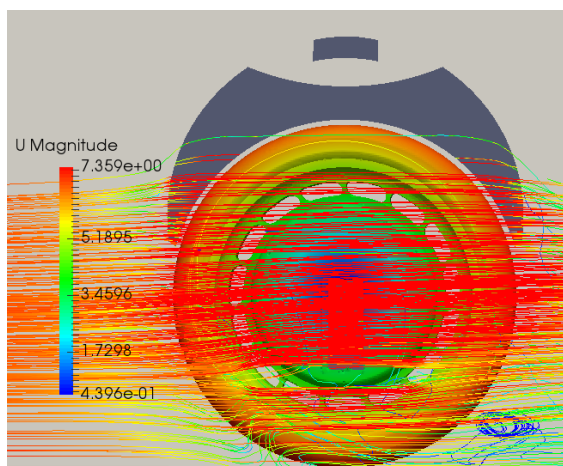


Figura 87. Líneas de corriente a 25 km/h.

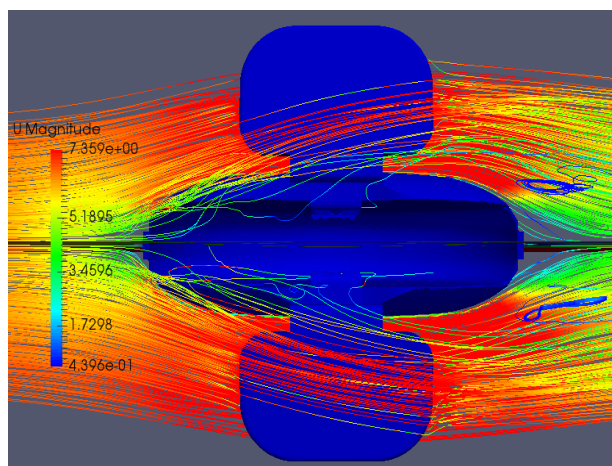


Figura 88. Líneas de corriente para parte estática.

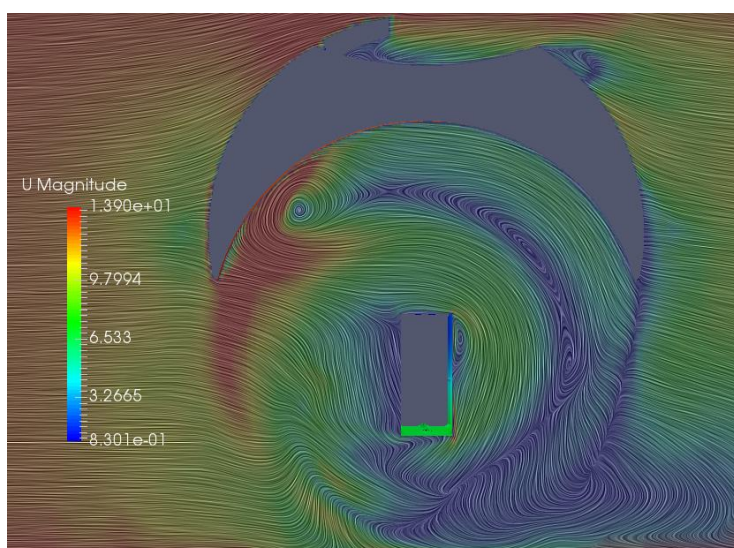


Figura 89. Surface LIC para velocidad de 50 km/h

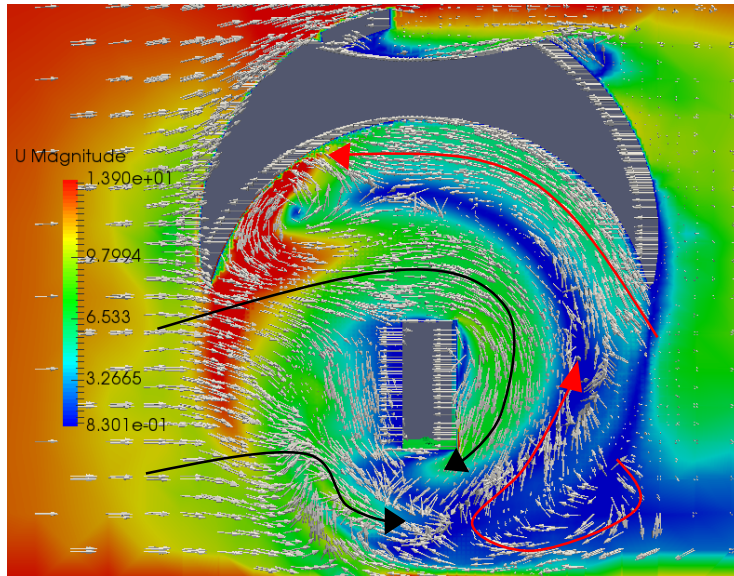


Figura 90. Vectores velocidad a 50 km/h

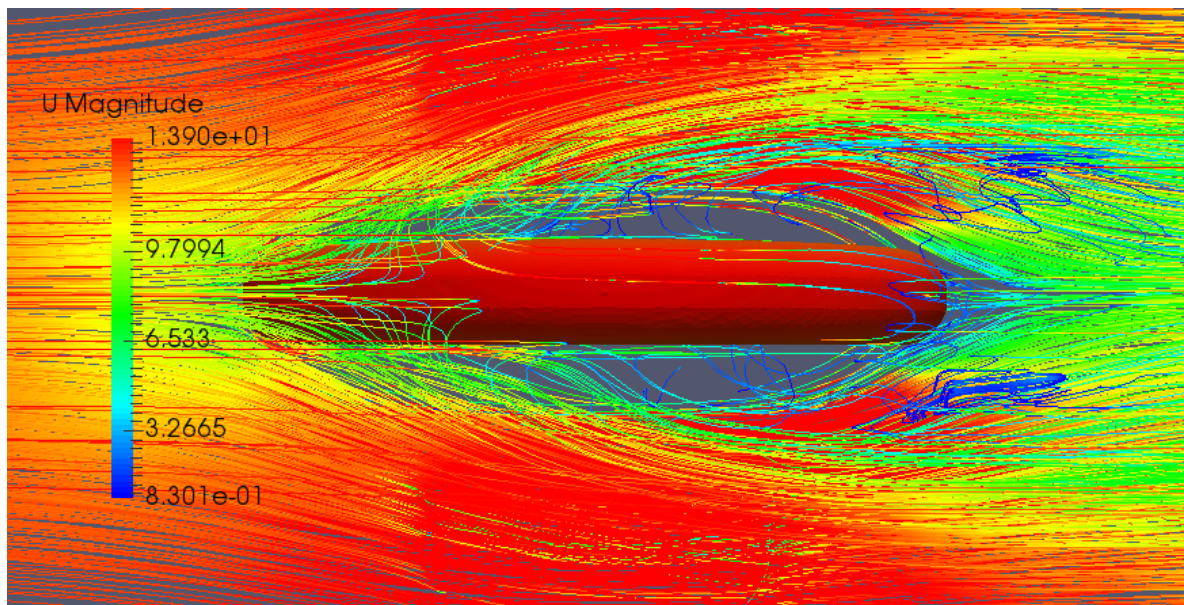


Figura 91. Líneas de corriente a 50 km/h para la parte rotatoria del Kingsong KS-18L.

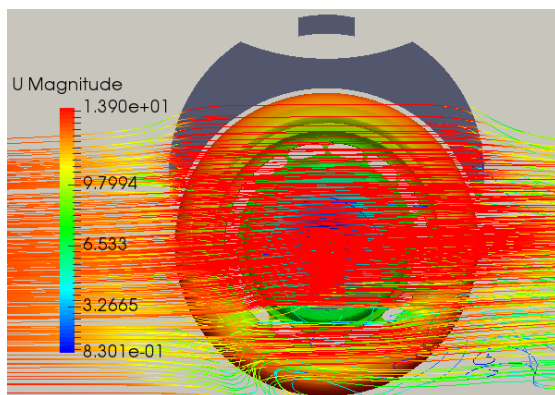


Figura 92. Líneas de corriente a 50 km/h.

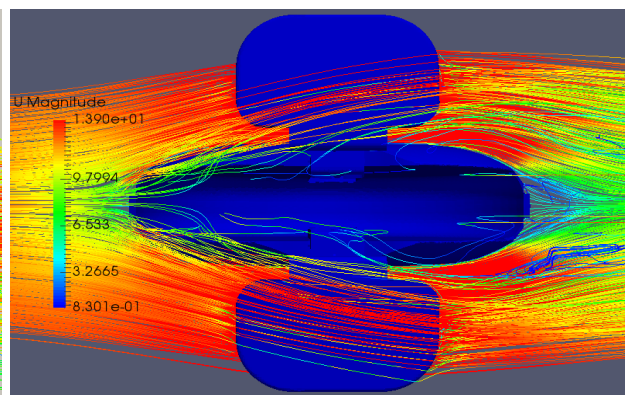


Figura 93. Líneas de corriente para parte estática.



Una vez obtenidas las figuras que más nos van a interesar de cara al estudio, procedemos a analizarlas y a extraer la información que nos están suministrando.

En primer lugar, si cogemos las imágenes en las que se ha usado en complemento Surface LIC (Figura 79, 84 y 89), se aprecia fácilmente el camino que recorre el flujo en el interior del monociclo. Como podemos observar, existen varias zonas donde se produce reflujo de aire y este tiende a velocidad nula.

Para ayudarnos a entender cómo se produce esa recirculación del fluido se han incluido los vectores velocidad (Figura 80, 85 y 90). Estos vectores se han representado mediante flechas e indican hacia donde se mueve el flujo en cada instante. De esta forma, si vemos la Figura 90, en ella, aparte de los vectores velocidad podemos diferenciar 4 curvas insertadas posteriormente. Las líneas negras distinguen los principales caminos que recorre el flujo para entrar en el interior del monociclo, por el contrario, las rojas muestran el fluido en recirculación que causa la reducción de la velocidad del entrante.

Por último, nos centraremos en las imágenes en las cuales aparecen las líneas de corriente. Estas se han dividido en 3, una en la que vemos las líneas de corriente alrededor de la rueda (Figura 81, 86 y 91), otra en la que vemos el interior del monociclo lateralmente (Figura 82, 87 y 92) y una última en la que se aprecia cómo se comporta la corriente en el interior de la carcasa (Figura 83, 88 y 93). Si nos fijamos en las figuras con la rueda y la carcasa por separado, nos daremos cuenta de que el aire evita en gran parte atravesar el interior del monociclo, es decir, de todas las líneas de corriente que existen, solo un pequeño número de ellas son las que, al entrar en contacto con el monociclo, recorren el interior de nuestra geometría.

A la luz de los resultados obtenidos podemos afirmar que, como suponíamos, existe algún problema en la aerodinámica del monociclo Kingsong KS-18L. Teniendo estos datos como base, podemos pensar en si habrá otras variables que estén relacionadas con la velocidad y que

puedan ser causantes de lo sucedido. Con este fin, se van a analizar la presión, la viscosidad y la fuerza de arrastre.

3.1.4. Análisis del campo presión.

Para estudiar el campo de presión debemos recordar que la zona que nos interesa de nuestro monociclo es recorrida por una parte muy pequeña del total del aire (Figura 94-99). Con esto se quiere decir que, como la mayoría del aire evade discurrir entre el interior de la carcasa y el motor, la velocidad del flujo que veíamos anteriormente era muy baja y podemos esperar que lo ocurrido con la presión sea análogo.

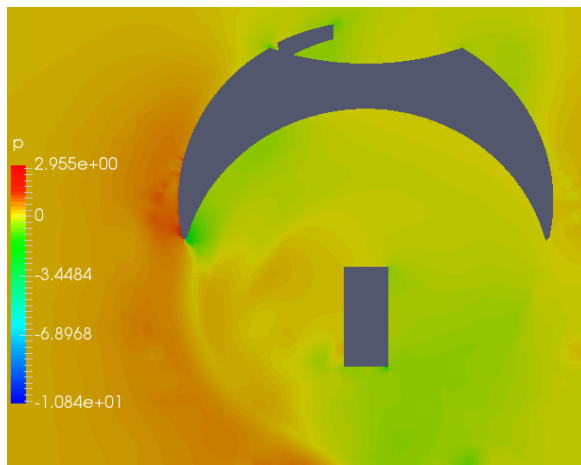


Figura 94. Campo presión a 5 km/h.

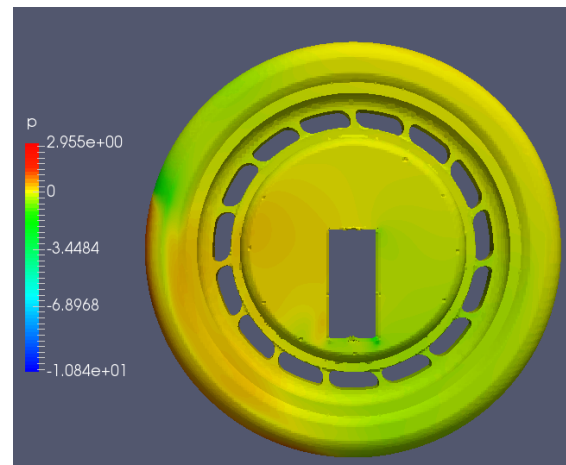


Figura 95. Campo presión sobre la rueda a 5 km/h.

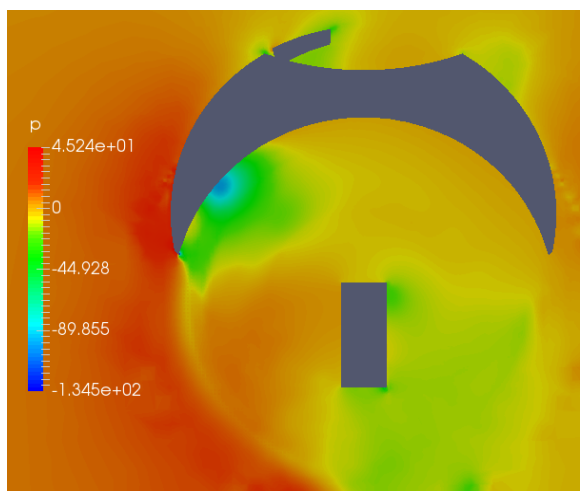


Figura 96. Campo presión a 25 km/h.

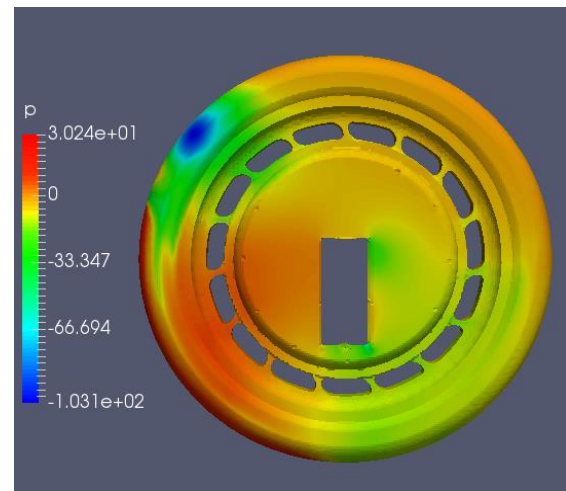


Figura 97. Campo presión sobre la rueda a 25 km/h.

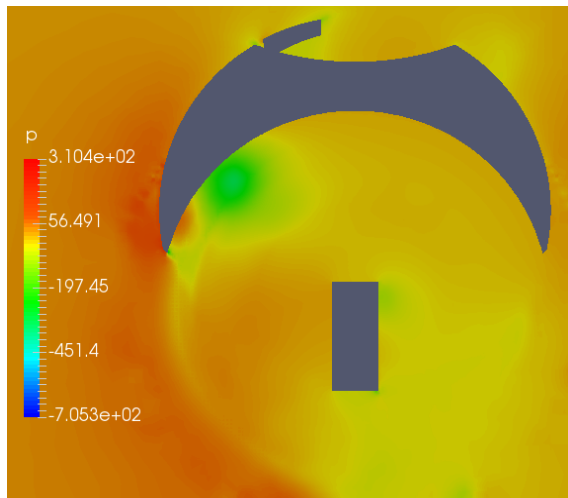


Figura 98. Campo presión a 25 km/h.

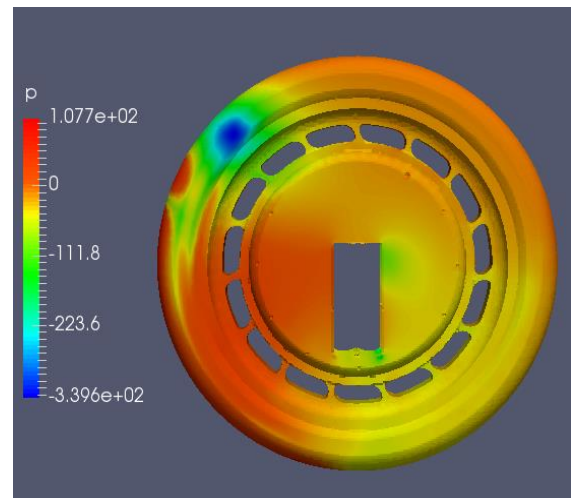


Figura 99. Campo presión sobre la rueda a 5 km/h.

Nuevamente se han usado las 2 velocidades más extremas estudiadas y la intermedia para así comparar y asegurarnos las fenomenologías que acontecen y estamos describiendo son similares.

Nótese que las leyendas no muestran una presión absoluta, sino que nos está mostrando diferencias de presión entre nuestra presión de entrada que sería 0 Pa y cada zona de la malla computacional. Dicho esto, se aprecia con facilidad que como era de esperar, para 5 km/h la presión máxima que soporta el monociclo es casi la misma que parado mientras que, a 50 km/h son prácticamente 3 atmósferas (310 MPa).

Una vez presentados los datos que nos muestran las figuras, pasamos a interpretar las imágenes en sí. Localizaremos las mismas 3 zonas en cada una de ellas, estas son la de presión máxima, mínima y la que es aproximadamente constante.

La zona de máxima presión, como es lógico, se presenta donde el fluido se encuentra directamente con el vehículo, es decir, en la zona frontal del monociclo. Por el contrario, la zona de menos presión está justo detrás de la de máxima presión. Tiene sentido que sea así ya que, como el aire incide directamente en la parte frontal, justo detrás se crea una zona de depresión.



En el resto del interior del monociclo no se aprecian grandes cambios de presión puesto que, como antes se mencionó, al no pasar gran cantidad de fluido por esta región, la presión no experimentará grandes cambios.

3.1.5. Análisis de la viscosidad.

Una de las magnitudes que más influye en la velocidad de un fluido es la viscosidad turbulenta que desarrolla el flujo a altos números de Reynolds. Si esta es muy alta, el fluido incluso llega a pararse por completo. Es por esto que a continuación se mostrará cómo se comporta la variable “nut” que representa la viscosidad turbulenta en nuestro dominio computacional (Figura 100-102).

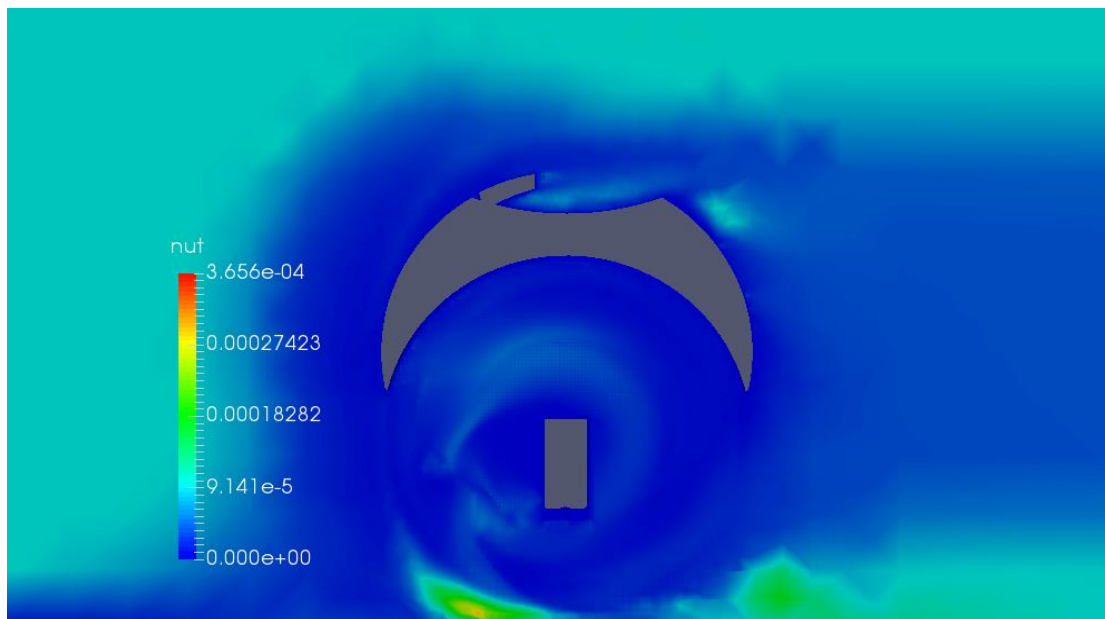


Figura 100. Viscosidad turbulenta para velocidad de 5 km/h.

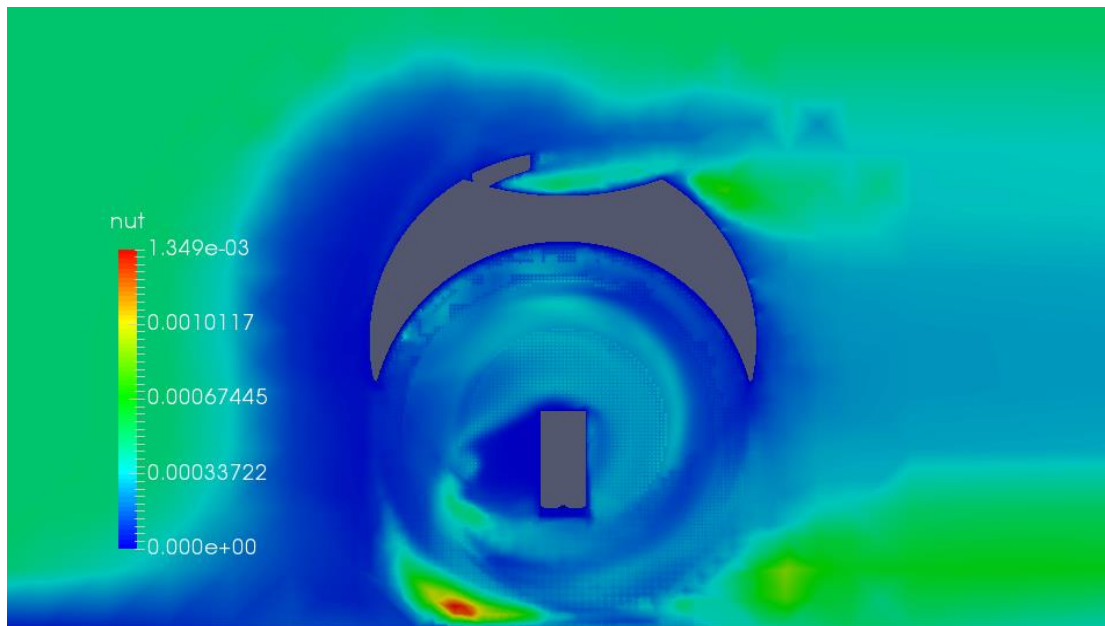


Figura 101. Viscosidad turbulenta para velocidad de 25 km/h.

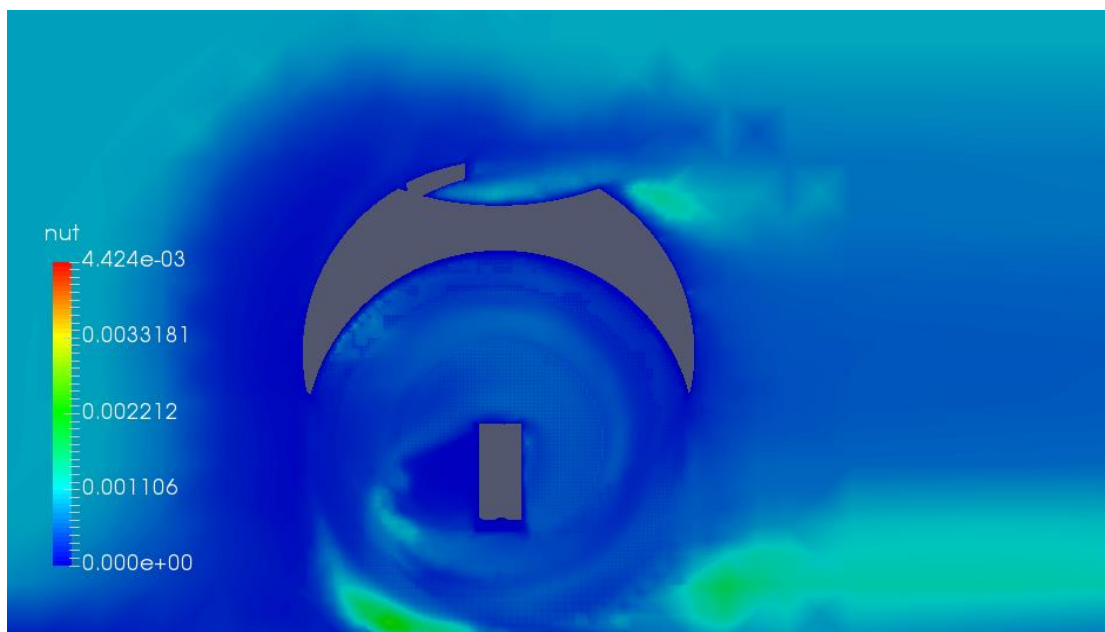


Figura 102. Viscosidad turbulenta para velocidad de 50 km/h.

Analizando estas imágenes se puede observar rápidamente cómo la viscosidad turbulenta en el interior del monociclo tiende a ser nula. Esto quiere decir que la viscosidad laminar es la predominante, lo cual es un problema para nosotros ya que si queremos que el aire pueda desplazarse



con fluidez en esta región necesitamos que la viscosidad turbulenta sea mayor que la laminar.

En este punto debemos comprender la importancia de la capa límite en la aerodinámica. La capa límite es la región en la cual la velocidad de nuestro fluido cae bruscamente de su valor en la región exterior a cero (velocidad del objeto sólido). Si tomamos que los fluidos en régimen laminar van a moverse como capas contiguas y separadas, la influencia de la capa límite se establecerá desde la lámina de fluido con velocidad 0 hasta la que no se ve influenciada y se mantiene constante en todo el dominio.

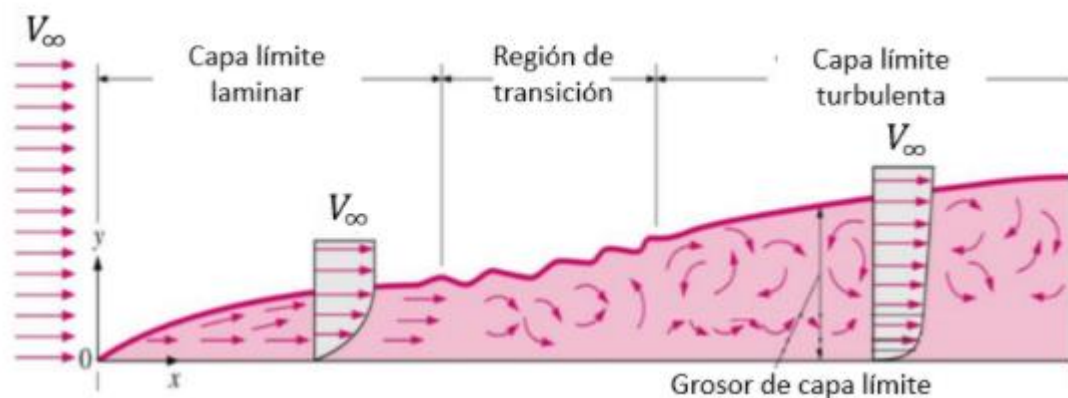


Figura 103. Transición de la capa límite. [19]

En la figura 103 observamos cómo la velocidad al encontrarse con un cuerpo, disminuye hasta hacerse nula en la superficie y que, conforme nos vamos distanciando, la velocidad tiende a mantenerse como era originalmente. Si la velocidad es suficiente como para vencer esta capa viscosa, el flujo empezará a mostrar vorticidad y esto dará lugar a un flujo turbulento.

Pensando en nuestro caso, debemos tener en cuenta que necesitamos que, en la región existente entre la rueda y el interior de la carcasa del monociclo, las diferencias de presión y velocidad sean lo mayores posibles ya que esto influiría positivamente en una alta convección, lo cual ayudaría a una mejor refrigeración del monociclo.



Dado que lo que tenemos es viscosidad laminar, es decir, domina el flujo laminar, se debería pensar alguna opción para que el flujo cambiase a turbulento. Algunas formas de llegar a este fin pueden ser variar el ángulo de ataque con el que incide el flujo sobre la simetría, modificar la rugosidad de los materiales o insertar protuberancias que perturben la circulación del fluido.

3.1.6. Análisis de las fuerzas de arrastre.

Las fuerzas de arrastre aparecen cuando un cuerpo atraviesa un fluido. Estas ejercen unas fuerzas de resistencia que tienden a reducir la velocidad del fluido.

Esta variable también está relacionada con el número de Reynolds, de tal forma que, a bajo número de Reynolds, casi todos los esfuerzos viscosos se deberían a la fricción. Sin embargo, a altos números de Reynolds, tendríamos una caída de presión y todo el arrastre se produciría debido a la forma del objeto.

De esta forma, si el flujo es laminar (bajo número de Reynolds), las fuerzas viscosas son muy relevantes. Si el flujo es turbulento, tenemos una mayor transmisión de calor, se incrementa la capa límite como vimos anteriormente y el coeficiente de convección y las pérdidas por rozamiento disminuyen respecto del valor en régimen laminar.

Para poder entender el coeficiente de convección, primero hay que matizar que, debido a que tenemos una superficie caliente (motor) y un fluido en movimiento en contacto con ella (aire), el calor se va a transmitir por convección. Es por esto que podemos expresar el coeficiente de película o de convección como la influencia del fluido, de la superficie y del flujo en la transferencia de calor (Figura 104).

Con el fin de determinar este coeficiente partiremos de un planteamiento general para calcular la convección para un flujo incompresible en estado estacionario y se usarán algunas ecuaciones mostradas en el apartado 2 como la ecuación de la continuidad y la cantidad de movimiento.

$$dq = h (T_{sup} - T_f) dA$$

$$h = - \frac{k}{T_{sup} - T_f} \frac{dT}{dn} \Big|_{n \rightarrow 0}$$

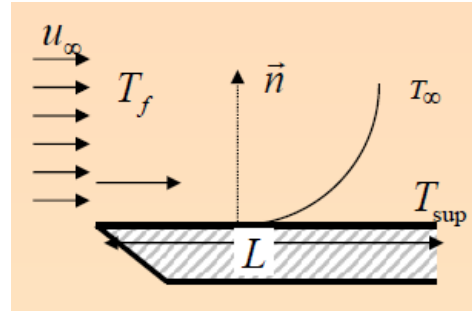


Figura 104. Capa límite térmica.

Donde:

- $T_f \rightarrow$ Temperatura del fluido.
- $T_{sup} \rightarrow$ Temperatura de la superficie.
- $n \rightarrow$ normal a la superficie.
- $dq \rightarrow$ variación de calor.
- $h \rightarrow$ coeficiente de película.
- $dA \rightarrow$ diferencial de superficie.
- $k \rightarrow$ conductividad térmica del fluido.
- $u_\infty \rightarrow$ velocidad.

Una vez tenemos nuestro planteamiento general, y ya que de convección hay muchos estudios realizados, pasaremos a nuestro caso particular, el cual podemos asemejar a un cilindro circular con flujo normal (Figura 105). Los adimensionales más relevantes para este caso en específico son:

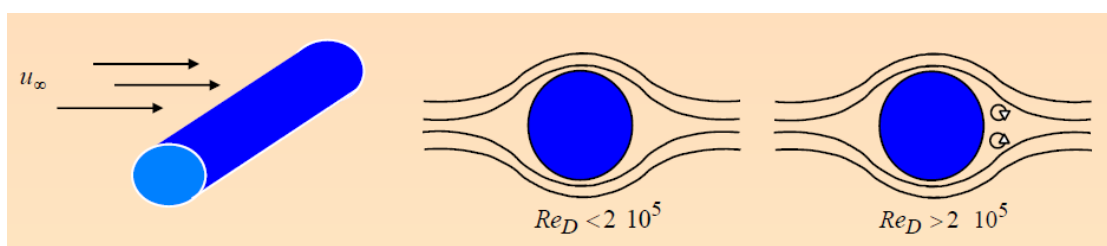


Figura 105. Flujo normal sobre cilindro circular.



$$Nu = \frac{hD}{k}$$

$$Re = \frac{\rho u_{\infty} D}{\mu}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

Donde:

- $Nu \rightarrow$ Nusselt.
- $Re \rightarrow$ Reynolds.
- $Pr \rightarrow$ Prandtl.
- $C_p \rightarrow$ calor específico.

Podemos sacar la relación que existe entre ellos:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Los coeficientes C y m dependen del número de Reynolds y están tabulados en prontuarios.

A simple vista nos damos cuenta de que nuestro coeficiente de convección está relacionado directamente con el Nusselt y este a su vez del Reynolds. De esta forma, debe haber una relación entre el número de Reynolds y el coeficiente de convección.

Puesto que nosotros vamos a centrarnos en la aerodinámica para darle una explicación a lo sucedido con la temperatura interior, esta relación optaremos por hacerla visualmente. Para ello, como sabemos que el coeficiente de película depende de muchas variables para llegar a determinar la influencia que hay entre el fluido, la superficie y la transferencia de calor que ocurre, se ha optado por representar las fuerzas de arrastre (Figura 106, 108 y 110) y compararlas con el Reynolds (Figura 107, 109 y 111). Esto es debido a que las fuerzas de arrastre van a denotar la relación entre la superficie y el fluido en la zona estudiada.

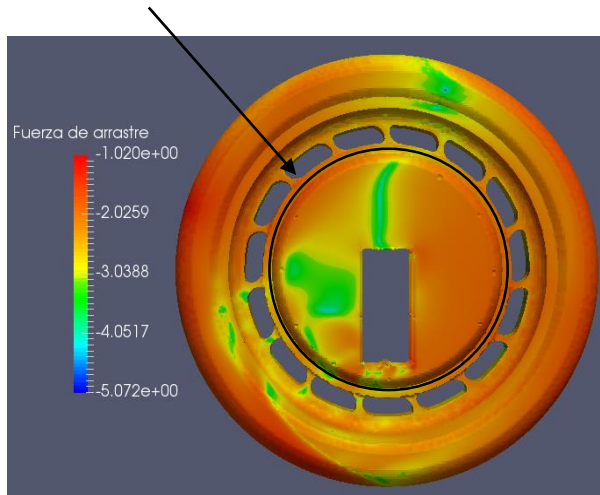


Figura 106. Fuerza de arrastre a 5 km/h.

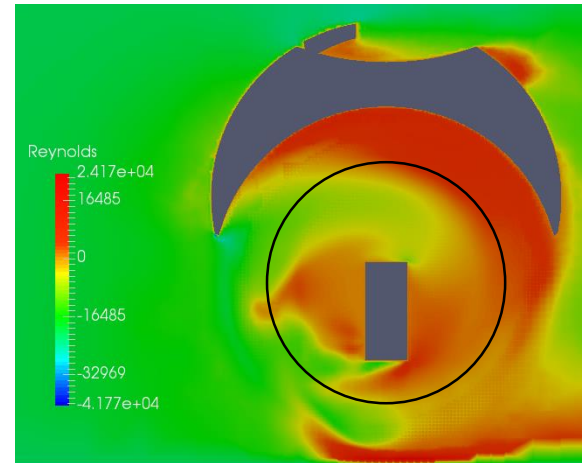


Figura 107. Reynolds a 5km/h.

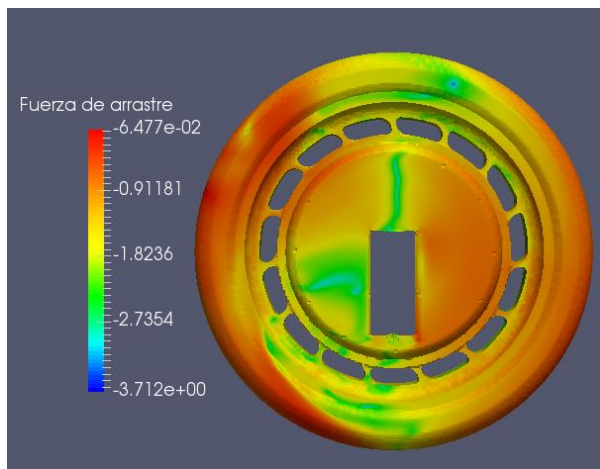


Figura 108. Fuerza de arrastre a 5 km/h.

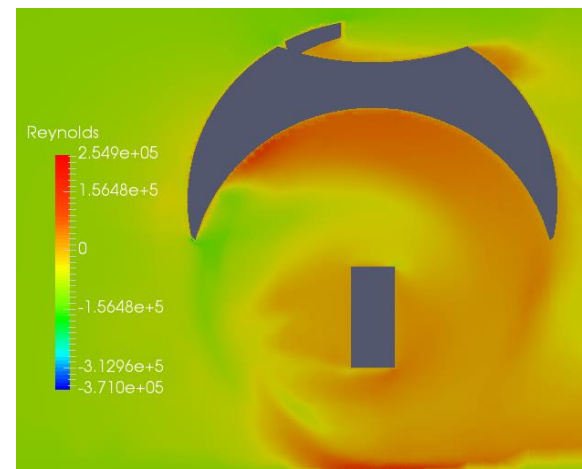


Figura 109. Reynolds a 25 km/h.

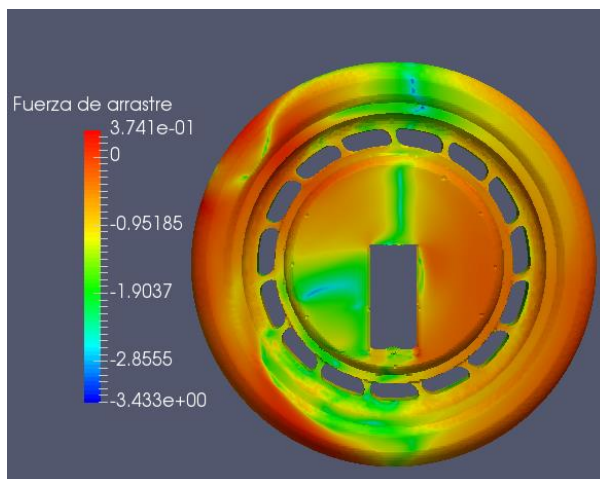


Figura 110. Fuerza de arrastre a 50 km/h.

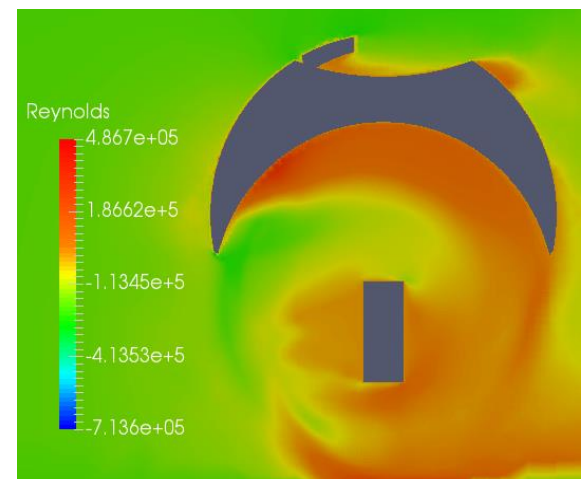


Figura 111. Reynolds a 50 km/h.



Para comenzar, debemos tener en cuenta que los resultados para la fuerza de arrastre están en escala logarítmica y tendrían una equivalencia aproximada de 10 elevado a -2.5.

Por otro lado, nuestra atención se concentrará solo en la parte del motor, sin importarnos el resto de la rueda. Esto es debido a que queremos observar la influencia que puedan tener los esfuerzos cortantes, a la hora de permitir el paso de fluido en esta zona con el fin de entender si tendría relación con la refrigeración del monociclo. Esta parte ha sido señalada en la figura 106.

Adicionalmente, notamos una relación entre la parte con el número de Reynolds más alto y con los esfuerzos cortantes más notables en la parte derecha del motor. También se distingue una misma disminución de los esfuerzos viscosos y del Reynolds a su vez en la parte superior del motor.

Es por todo esto que podemos concluir que existe una conexión entre los esfuerzos viscosos y el Reynolds. Estas tienen un papel relevante sobre la aerodinámica y, directamente, sobre la refrigeración del monociclo Kingsong KS-18L ya que también podemos relacionarlas con los diagramas de presión estudiados con anterioridad.

3.1.6.1. Analogía de Reynolds.

La relación existente entre la capa límite viscosa y la capa límite térmica se puede hallar a través de la analogía de Reynolds. Para ello, comenzaremos recordando las ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido suponiendo que la capa límite es bidimensional y estacionaria [20]:

$$\frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} = 0$$

Ecuación 11. Conservación de la masa.



$$\rho \left(u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} \right) = - \frac{dp}{dx} + \frac{\delta}{\delta y} \left(\mu \frac{\delta}{\delta y} \right)$$

Ecuación 12. Cantidad de movimiento.

$$\rho \left(u \frac{\delta h}{\delta x} + v \frac{\delta h}{\delta y} \right) = u \frac{dp}{dx} + \frac{\delta}{\delta y} \left(K \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \mu \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2$$

Ecuación 13. Conservación de la energía.

Las condiciones de contorno que determinan estas ecuaciones son:

$$\begin{array}{lll} y=0, & u=v=0, & T=T_p(x); \\ y/\delta \rightarrow \infty, & u=U_e(x), & T=T_e(x); \\ x=0, & u=u_0(y), & T=T_0(y); \end{array}$$

Donde T_p es la temperatura de la pared, T_e y U_e son la temperatura en el borde exterior de la capa límite. Éstas están relacionadas con la presión exterior $p(x)$ mediante la ecuación de Euler:

$$\rho U_e \frac{dU_e}{dx} = - \frac{dp}{dx}$$

$$\rho U_e \frac{dh_e}{dx} = U_e \frac{dp}{dx}$$

$$h_e = c_p T_e$$

En las siguientes secciones se supondrá un flujo incompresible con viscosidad constante y con los términos de trabajo y disipación viscosa despreciables.

Los términos $u dp/dx$ y $\mu(\delta u/\delta y)^2$ son despreciables frente a $\rho u \delta h/\delta x$ en la ecuación de la energía si:

$$\frac{U_e^2}{c_p |T_p - T_e|} \ll 1$$

Donde se ha hecho uso de $\delta_v/L \sim Re^{-1/2}$. Para los gases ideales se puede escribir en la forma:



$$M^2 \ll \frac{|T_p - T_e|}{(\gamma - 1)T_e}$$

“M” es el número de Mach ($M^2 \equiv U_e^2 / \gamma R_g T_e$), denota la corriente en el exterior. Si además se verifica que

$$\frac{|T_p - T_e|}{T_e} = O(1)$$

O menor, se tiene que $M^2 \ll 1$ y el gas puede considerarse incompresible. Con estas condiciones, las 3 ecuaciones principales se reducen a:

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} = 0$$

$$u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta v}{\delta y} = -U_e \frac{dU_e}{dx} + v \frac{\delta^2 u}{\delta y^2}$$

$$u \frac{\delta T}{\delta x} + v \frac{\delta T}{\delta y} = \frac{v}{Pr} \frac{\delta^2 T}{\delta y^2}$$

Se ha supuesto que c_p , K , μ son constantes.

Se observa que la ecuación de la energía es igual a la de la cantidad de movimiento (intercambiando u por T) si $Pr = 1$ y si $U_e = \text{constante} \equiv U$ (placa plana). Para que la analogía sea completa, también deben serlo las condiciones de contorno. Esto se consigue utilizando los adimensionales

$$\bar{u} = \frac{u}{U}; \quad \bar{v} = \frac{v}{U} Re^{-1/2}; \quad \bar{T} = \frac{T_p - T}{T_p - T_e}; \quad \xi = \frac{x}{L}; \quad \eta = \frac{y}{L} Re^{-1/2}$$

Suponiendo que T_p y T_e , al igual que U , son constantes, donde $Re = UL/\nu$.

Con estas variables y las hipótesis anteriores, las ecuaciones de cantidad de movimiento y energía y sus respectivas condiciones de contorno quedan como:

$$\bar{u} \frac{\delta \bar{u}}{\delta \xi} + \bar{v} \frac{\delta \bar{u}}{\delta \eta} = \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta \eta^2}$$



$$\bar{u} \frac{\delta \bar{T}}{\delta \xi} + \bar{v} \frac{\delta \bar{T}}{\delta \eta} = \frac{\delta^2 \bar{T}}{\delta \eta^2}$$

$$\begin{array}{lll} \eta = 0, & \bar{u} = \bar{v} = 0, & \bar{T} = 0; \\ \eta \rightarrow \infty, & \bar{u} = 1, & \bar{T} = 1; \\ \xi = 0, & \bar{u} = 1, & \bar{T} = 1; \end{array}$$

Adicionalmente se ha supuesto que $x = 0$, $u = U$ y $T_e = T$. De esta forma, conocida la solución de la capa límite viscosa (que en este caso viene dada por la solución de semejanza de Blasius), automáticamente se tiene la solución de la capa límite térmica sin más que igualar $\bar{u} = \bar{T}$.

3.1.7. Garantía de convergencia.

A la luz de los resultados obtenidos solo falta asegurar la fiabilidad de estos. Para ello se hará uso de los residuales y el valor y^+ , técnicas mencionadas en el capítulo 2.

3.1.7.1. Residuales.

En primer lugar, con la intención de verificar que los residuales de todas las simulaciones son análogos y que todos nos dan los valores esperados, se expondrá un ejemplo para dar una idea general del tipo de gráficas que se van a estudiar (Figura 112).

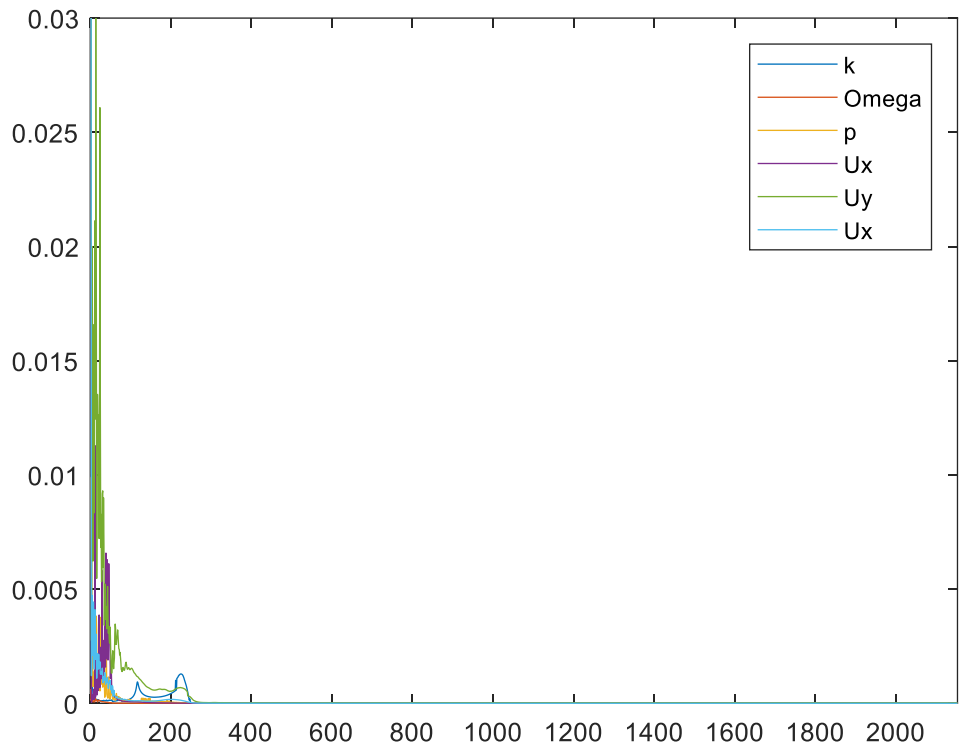
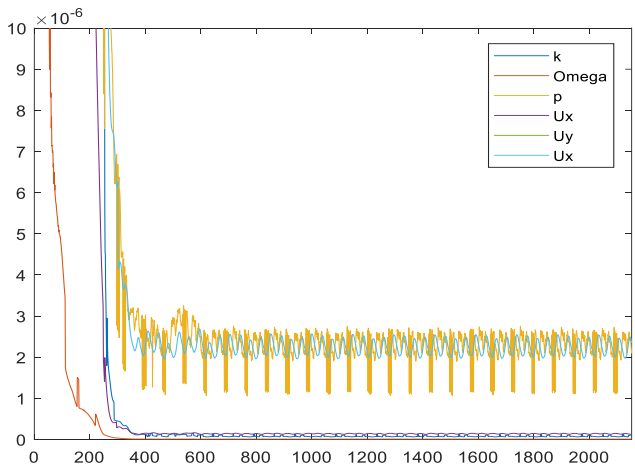


Figura 112. Residuales para velocidad de 5 km/h.

Dado que en las gráficas generales no podemos observar con claridad la convergencia, se pondrán de manifiesto los residuales de cada simulación creada centrándonos en la parte en que estos se vuelven estables (Tabla 3).

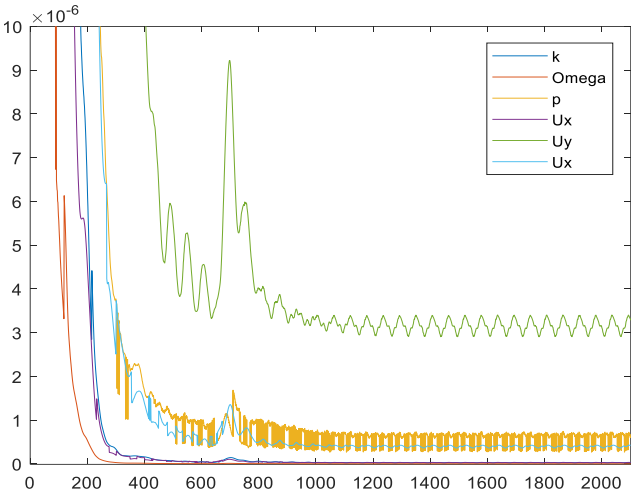
Tabla 3. Residuales.

5 km/h

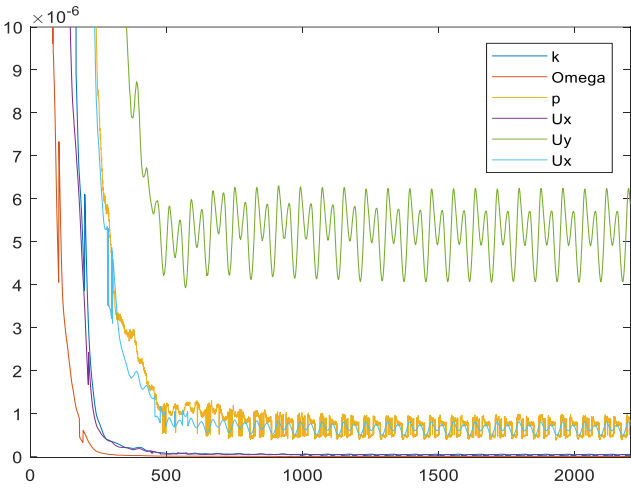




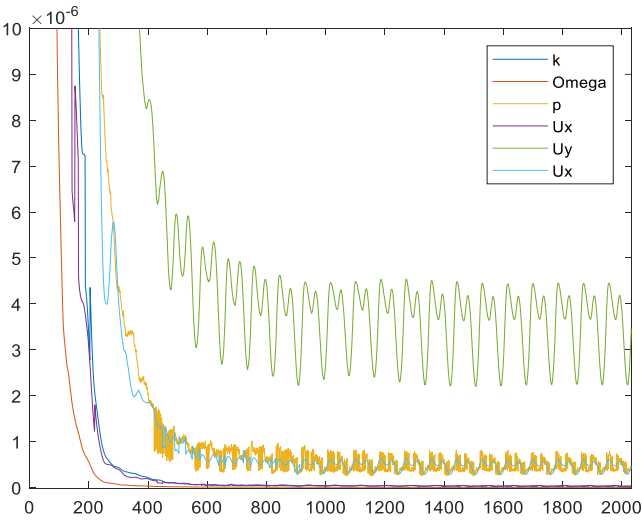
10 km/h



15 km/h

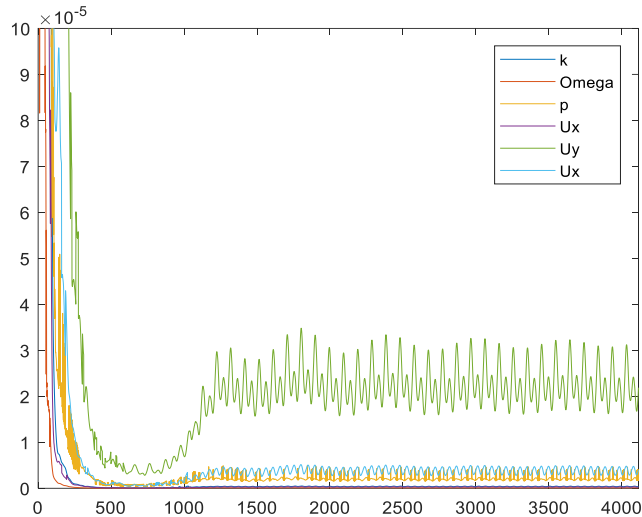


20 km/h

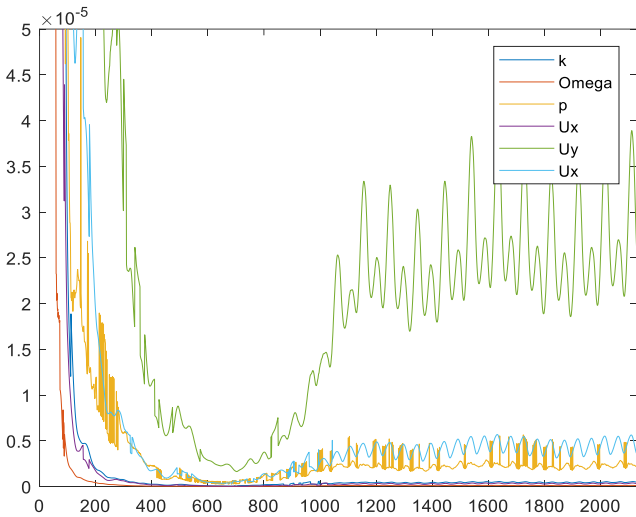




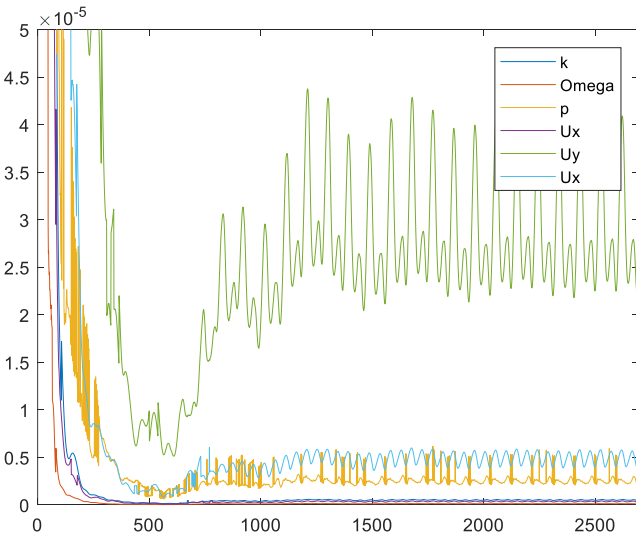
25 km/h



30 km/h

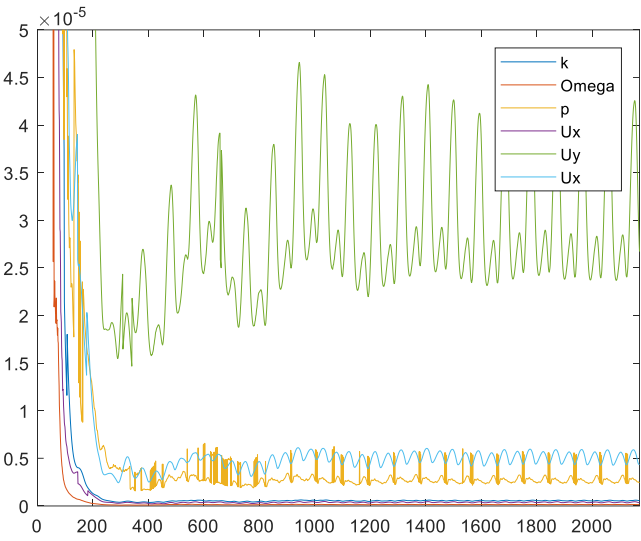


35 km/h

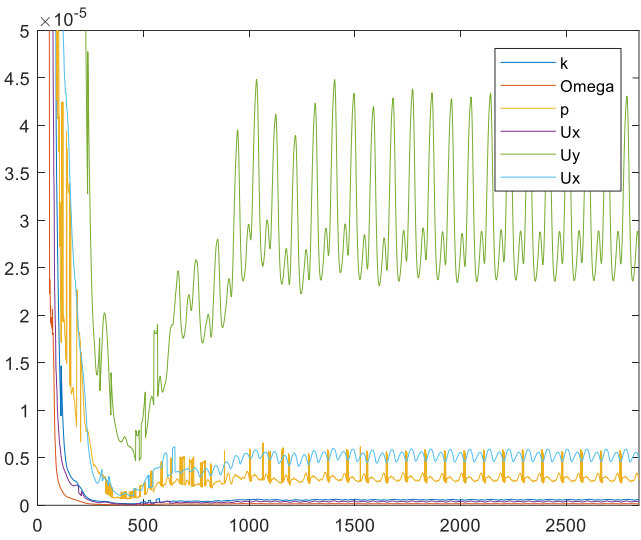




40 km/h

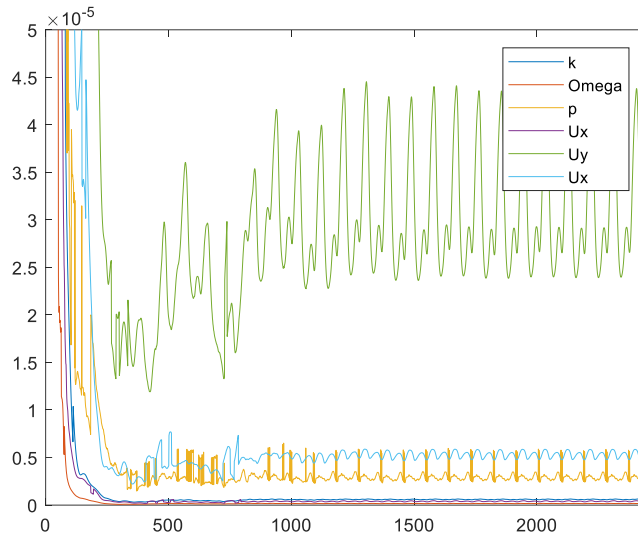


45 km/h





50 km/h



Una vez visualizados todos los residuales se concluye que son análogos. Para velocidades bajas, la convergencia es más rápida que para altas velocidades y también hay menos amplitud entre el rango de sus valores. Esto se produce porque como es normal, variables como la presión o la viscosidad, conforme más baja es la velocidad, antes van a llegar a un valor estable.

Podemos concluir que todas las simulaciones están correctamente completadas. Sin embargo, no podemos evaluar a partir de los residuales la calidad de la malla. De cara a evaluar el mallado procederemos a usar el valor de “ y^+ ”.

3.1.7.2. Valor y^+ .

El valor y^+ determina la calidad y resultados de la simulación creada. Este es una longitud adimensional que denota la distancia desde la pared hasta el punto más próximo en el cual se evalúa la velocidad. Es por esto que este factor refleja la resolución de la malla perpendicular a la pared en la que se estudia.



Al igual que vimos en el capítulo 2, buscaremos valores de y^+ inferiores a 300, lo cual denotaría que nuestra malla es de calidad (Figura 113).

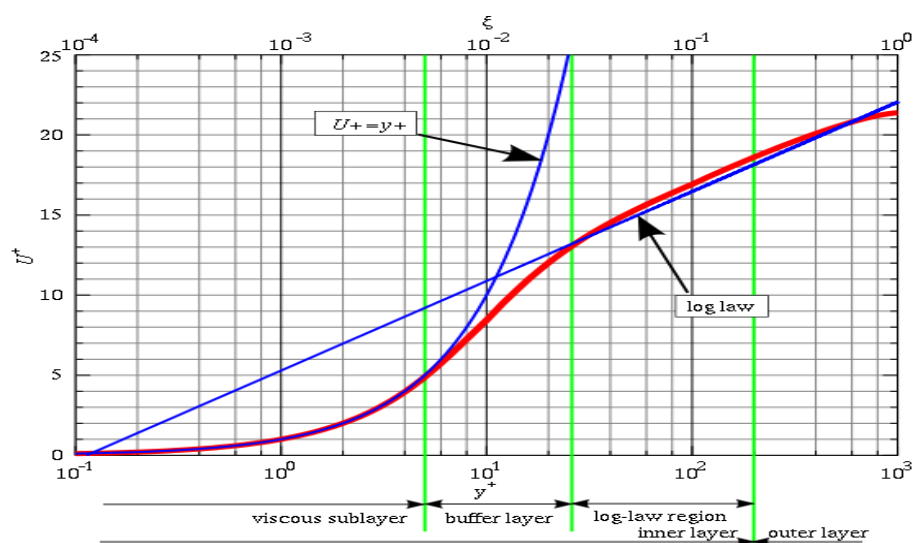


Figura 113. Gráfica y^+

Para poder analizar los datos de cada simulación usaremos el comando “yPlus” de OpenFoam pero, como los datos que arroja son del suelo, de la rueda y del exterior del monociclo, se creará una tabla con todas las simulaciones y con los datos más relevantes de cada una calidad (Figura 114 y Tabla 4).

```

Selecting incompressible transport model Newtonian
Selecting turbulence model type RAS
Selecting RAS turbulence model kOmegaSST
Patch 4 named ffminz, wall-function nutUSpaldingWallFunction, y+ : min: 0.105943
8105 max: 198.4109593 average: 11.36372554

Patch 6 named exteriorbueno, wall-function nutUSpaldingWallFunction, y+ : min: 0
.08860191567 max: 28.37347497 average: 8.483471301

Patch 7 named ruedabuena, wall-function nutUSpaldingWallFunction, y+ : min: 0.15
99120976 max: 24.15592732 average: 5.307958442
  
```

Figura 114. y^+ para velocidad de 5 km/h.

Tabla 4. Valores de y^+

Velocidad (km/h)	Rueda			Exterior		
	y^+ min.	y^+ máx.	y^+ media	y^+ min.	y^+ máx.	y^+ media
5	0.159	24.15	5.31	0.089	28.37	8.48
10	0.672	39.09	8.56	0.127	55.81	14.28
15	0.664	50.52	12.07	0.157	81.91	19.79



20	0.493	64.29	15.14	0.183	108.3	25.12
25	1.284	82.31	18.88	0.211	152.8	31.78
30	1.509	91.98	20.88	0.226	157.9	35.36
35	1.711	105.5	23.68	0.245	185.5	40.27
40	1.419	118.7	26.58	0.262	202.6	45.17
45	1.928	131.8	29.24	0.281	246.8	49.9
50	2.112	144.9	31.93	0.295	279.9	54.75

Si examinamos los valores de y^+ , podemos distinguir 2 grupos. El primer grupo compuesto por el mínimo, el máximo y el valor medio de y^+ en la malla contigua a la rueda y estos mismos, pero para la carcasa del monociclo.

Centrándonos únicamente en el grupo de datos para la rueda, se observa que los valores son bastante bajos incluso los mínimos cerca del 0, esto quiere decir que la malla en esta zona es de gran resolución.

Por otra parte, ahora usaremos los valores relacionados con la carcasa y, aunque los valores mínimos sean incluso inferiores a los de la rueda, los máximos se aproximan mucho a 300. Esto podría ser un problema si no tuviésemos el dato de la media. Gracias a la media podemos hacernos una idea de que, a pesar de que haya valores cercanos a 300, estos valores deben ser puntuales y aislados. Visto que la mayoría de datos en esta zona están también lejos de nuestro límite, podemos asegurar que de nuevo tenemos un buen mallado y, por consiguiente, una buena simulación.

3.2. Conclusiones.

Para comenzar, una de nuestras mayores inquietudes ha sido crear una malla con la suficiente precisión para que, posteriormente, podamos extraer el resto de conclusiones de forma segura y confiada.

De esta forma, si hacemos uso del apartado “garantía de convergencia”, deduciremos una clara validez de los datos que nos



afirman que la malla es totalmente correcta y que podemos dar los siguientes pasos con total confianza.

Por otro lado, debemos recordar que el otro gran objetivo de este estudio era analizar los patrones aerodinámicos entre la carcasa del motor eléctrico y el chasis del vehículo, así como su efecto sobre la refrigeración del motor.

De cara a conocer los patrones aerodinámicos, hemos hecho uso de diferentes herramientas de OpenFoam como pueden ser las líneas de corriente. Con esto llegamos a la conclusión de que la aerodinámica interna del monociclo Kingsong KS-18L no es la óptima ya que solo una pequeña porción del total de flujo atraviesa el interior de éste.

Por último, si analizamos los patrones aerodinámicos y otras variables como la velocidad, la presión o la viscosidad, denotaremos una clara relación entre todas ellas. Si además de estas usamos la analogía del Reynolds para relacionar la capa límite viscosa con la térmica, desembocaremos en una conexión directa entre la termodinámica y la aerodinámica del monociclo. Es en este punto, es cuando podemos afirmar con firmeza que el monociclo Kingsong KS-18L debe sus problemas de refrigeración a fallos en su diseño que desenlazan en una mala aerodinámica.



Anexos.

Anexo 1. Índice de tablas.

Tabla 1. Nomenclatura y notación	21
Tabla 2. Condiciones de contorno.	37
Tabla 3. Residuales.	72
Tabla 4. Valores de y^+	77

Anexo 2. Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación de la conservación de la masa.	23
Ecuación 2. Teorema del Transporte de Reynolds.	23
Ecuación 3. Teorema de Gauss.	23
Ecuación 4. Ecuación de la conservación de la masa.	23
Ecuación 5. Ecuación cantidad de movimiento.....	24
Ecuación 6. Aceleración para un marco giratorio.	25
Ecuación 7. Las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes en el marco inercial con viscosidad molecular constante	26
Ecuación 8. Ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles en el marco giratorio, en términos de velocidades de rotación.....	27
Ecuación 9. Ecuación 8 escrita en términos de la velocidad absoluta. ..	27
Ecuación 10. Ecuaciones de Navier-Stokes en formato integral.	28
Ecuación 11. Conservación de la masa.....	68
Ecuación 12. Cantidad de movimiento.....	69
Ecuación 13. Conservación de la energía.	69

Anexo 3. Índice de figuras.

Figura 1. Rueda Clásica [4]	9
Figura 2. Rueda Lenticular [5].....	9
Figura 3. Modelo Kingsong KS 18L. [6]	9
Figura 4. Esquema de un monociclo genérico (Patente)	10



Figura 5. Interior de un monociclo genérico (Patente)	10
Figura 6. Interior real del modelo KS-18L [8].....	10
Figura 7. Interior real de la rueda [8].....	10
Figura 8. Desmontaje Kingsong KS-18L [8].....	11
Figura 9. Kingsong KS-18L modelado en Catia.....	11
Figura 10. Carcasa Kingsong KS-18L.....	11
Figura 11. Rueda y llanta Kingsong KS-18L.....	12
Figura 12. Tapas de motor.....	12
Figura 13. Pedales y soportes de pedales.....	12
Figura 14. Asa de transporte.	13
Figura 15. Estator.	13
Figura 16. Magnetismos (rotor).....	13
Figura 17. Rodamientos.....	13
Figura 18. Xiaomi Mi Scooter Pro. [9]	14
Figura 19. Mi Scooter Pro plegada. [10]	14
Figura 20. Uso Xiaomi Mi Scooter pro. [11]	14
Figura 21. Cómo subir a monociclo eléctrico. [12].....	15
Figura 22. Portabilidad monociclo [12].....	15
Figura 23. Giro con monociclo eléctrico.[13].....	16
Figura 24. Scooter Stickway Segway. [14].....	16
Figura 25. Uso de un segway. [15]	17
Figura 26. Temperatura frente a la distancia recorrida.	19
Figura 27. Altitud frente a la distancia recorrida.....	19
Figura 28. Velocidad frente a la distancia recorrida.....	19
Figura 29. Malla estructurada.	28
Figura 30. Etapas para realizar una simulación numérica	30
Figura 31. Geometría monociclo Kingsong KS-18L.....	31
Figura 32. Conjunto móvil.	31
Figura 33. Conjunto estático.	31
Figura 34. Interfaz Oracle VM VirtualBox.....	32
Figura 35. Malla de fondo.	33
Figura 36. Dimensiones de la malla de fondo. [6].....	34
Figura 37. Malla de fondo dividida.	34



Figura 38. Contenido del archivo “MRFPProperties”	35
Figura 39. Refinado de nivel 2-3.....	35
Figura 40. Refinado de nivel 4-5.....	35
Figura 41. Refinado de nivel 4-5.....	40
Figura 42. Nivel de refinamiento en el archivo SnappyHexMesh.....	40
Figura 43. Archivo “U” de referencia.....	41
Figura 44. Archivo “U” modificado.	41
Figura 45. Archivo “MRFPProperties” modificado	42
Figura 46. Archivo “MRFPProperties” de referencia	42
Figura 47. Gráfica de residuales.....	43
Figura 48. Gráfica de los valores de y^+	44
Figura 49. Resultados de y^+	44
Figura 50. Velocidad de 5 km/h	46
Figura 51. Presión para una velocidad de 5 km/h.....	46
Figura 52. Velocidad de 50 km/h	47
Figura 53. Presión para velocidad de 50 km/h.....	47
Figura 54. Simulación a 5 km/h	48
Figura 55. Simulación a 10 km/h	48
Figura 56. Simulación a 15 km/h	48
Figura 57. Simulación a 20 km/h	48
Figura 58. Simulación a 25 km/h	49
Figura 59. Simulación a 30 km/h	49
Figura 60. Simulación a 35 km/h	49
Figura 61. Simulación a 40 km/h	49
Figura 62. Simulación a 45 km/h	49
Figura 63. Simulación a 50 km/h	49
Figura 64. Estela completa de velocidad para el monociclo a 25 km/h .	50
Figura 65. Rueda a 5 km/h	51
Figura 66. Rueda a 10 km/h	51
Figura 67. Rueda a 15 km/h	51
Figura 68. Rueda a 20 km/h	51
Figura 69. Rueda a 25 km/h	51
Figura 70. Rueda a 30 km/h	51



Figura 71. Rueda a 35 km/h	51
Figura 72. Rueda a 40 km/h	51
Figura 73. Rueda a 45 km/h	52
Figura 74. Rueda a 50 km/h	52
Figura 75. Plano de visualización.	52
Figura 76. Flujo interior a 5 km/h.	53
Figura 77. Flujo interior a 25 km/h.	53
Figura 78. Flujo interior a 50 km/h.	53
Figura 79. Surface LIC para velocidad de 5 km/h	54
Figura 80. Vectores velocidad a 5 km/h.....	54
Figura 81. Líneas de corriente a 5 km/h para la parte rotatoria del Kingsong KS-18L.....	54
Figura 82. Líneas de corriente a 5 km/h.	55
Figura 83. Líneas de corriente para parte estática.	55
Figura 84. Surface LIC para velocidad de 25 km/h	55
Figura 85. Vectores velocidad a 25 km/h.....	55
Figura 86. Líneas de corriente a 25 km/h para la parte rotatoria del Kingsong KS-18L.....	56
Figura 87. Líneas de corriente a 25 km/h.	56
Figura 88. Líneas de corriente para parte estática.	56
Figura 89. Surface LIC para velocidad de 50 km/h	56
Figura 90. Vectores velocidad a 50 km/h.....	57
Figura 91. Líneas de corriente a 50 km/h para la parte rotatoria del Kingsong KS-18L.....	57
Figura 92. Líneas de corriente a 50 km/h.	57
Figura 93. Líneas de corriente para parte estática.	57
Figura 94. Campo presión a 5 km/h.	57
Figura 95. Campo presión sobre la rueda a 5 km/h.....	59
Figura 96. Campo presión a 25 km/h.....	59
Figura 97. Campo presión sobre la rueda a 5 km/h.....	59
Figura 98. Campo presión a 25 km/h.....	60
Figura 99. Campo presión sobre la rueda a 5 km/h.....	60
Figura 100. Viscosidad turbulenta para velocidad de 5 km/h.....	61



Figura 101. Viscosidad turbulenta para velocidad de 25 km/h.....	62
Figura 102. Viscosidad turbulenta para velocidad de 50 km/h.....	62
Figura 103. Transición de la capa límite. [19]	63
Figura 104. Capa límite térmica.	65
Figura 105. Flujo normal sobre cilindro circular.	65
Figura 106. Fuerza de arrastre a 5 km/h.....	67
Figura 107. Reynolds a 5km/h.	67
Figura 108. Fuerza de arrastre a 5 km/h.....	67
Figura 109. Reynolds a 25 km/h.	67
Figura 110. Fuerza de arrastre a 50 km/h.....	67
Figura 111. Reynolds a 50 km/h.	67
Figura 112. Residuales para velocidad de 5 km/h.	72
Figura 113. Gráfica y^+	77
Figura 114. Y^+ para velocidad de 5 km/h.	77





Bibliografía:

- [1] “La demanda de patinetes eléctricos sube un 1000% en un año.”
<https://movilidadelectrica.com/demanda-de-patinetes-electricos/> (accessed Sep. 03, 2020).
- [2] “Informe: La historia de las ruedas.” https://www.ciclismoafondo.es/reportajes-ciclismo/informe-la-historia-de-las-ruedas_37995_102.html (accessed Sep. 03, 2020).
- [3] “La rueda y su importancia en la competición contrarreloj – Velectris.”
<http://www.velectris.es/la-rueda-y-su-importancia-en-la-competicion-contrarreloj/> (accessed Sep. 03, 2020).
- [4] “Rueda Cyber10 24” cromo | xYz Distribution.”
<http://xyzdistribution.com/producto/rueda-trasera-cyber10-24-cromo-gurpil/> (accessed Sep. 03, 2020).
- [5] “Rueda Lenticular Notorious Zero Trasera | imbikes.com.”
<https://imbikes.com/ruedas-bicicletas/montadas/ruedas-de-carbono/rueda-lenticular-notorious-zero-trasera.html> (accessed Sep. 03, 2020).
- [6] F. Malizia, H. Montazeri, and B. Blocken, “CFD simulations of spoked wheel aerodynamics in cycling: Impact of computational parameters,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 194, no. February, p. 103988, 2019, doi: 10.1016/j.jweia.2019.103988.
- [7] R. Cited, “United States Patent,” vol. 2, no. 12, 2015.
- [8] “Desmontaje Kingsong 18XL.” .
- [9] “Mi Electric Scooter Pro - Xiaomi España.”
<https://m.buy.mi.com/es/item/3192400001#product> (accessed Sep. 11, 2020).
- [10] “Xiaomi Mi Electric Scooter Pro 2 - Patinete Eléctrico Negro - TuXiaomi.es.”
<https://tuxiaomi.es/tienda-xiaomi/xiaomi-mi-electric-scooter-pro-2-patinete-electrico/> (accessed Oct. 14, 2020).
- [11] “Xiaomi vende en España su nuevo móvil y un patinete eléctrico.”
https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20200728/xiaomi-vende-espana-nuevo-patinete-electrico-barato/508699340_0.html (accessed Sep. 11,



2020).

- [12] “Monociclo Eléctrico 【2020】 Monociclo autoequilibrado.”
<https://tumovilidadurbana.com/monociclo-electrico/> (accessed Sep. 11, 2020).
- [13] “Razones para tener un monociclo eléctrico.” <https://www.delujoblog.com/sin-categoria/razones-monociclo-electrico.html> (accessed Sep. 11, 2020).
- [14] “Scooter Stickway Segway | Segways Ireland | EMovement.”
<https://www.emovement.ie/product/scooter-stickway-segway/> (accessed Sep. 11, 2020).
- [15] “Business News | Sky News.” <https://news.sky.com/story/wheels-come-off-segway-personal-transporter-axed-after-high-profile-crashes-12013781>
(accessed Sep. 11, 2020).
- [16] “Marco de referencia móvil para la dinámica de fluidos computacional | Symscape.” <https://www.symscape.com/blog/moving-reference-frame-for-cfd>
(accessed Sep. 04, 2020).
- [17] “MRF development - OpenFOAMWiki.”
http://openfoamwiki.net/index.php/See_the_MRF_development (accessed Sep. 07, 2020).
- [18] “SST K-Omega Turbulence Models | CFD | Autodesk Knowledge Network.”
<https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html> (accessed Sep. 09, 2020).
- [19] “La capa límite - Aerodinámica F1.” <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/> (accessed Oct. 02, 2020).
- [20] “Conveccion.”
- [21] “Monociclo Eléctrico Kingsong 18L | Kingsong...”
<https://www.kingsong.es/es/313620/nuevo-modelo-monociclo-electrico-kingsong-18l-.htm> (accessed Sep. 03, 2020).