

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Análisis aerodinámico de un vehículo de tracción humana por medio de simulaciones fluido-dinámicas para la competencia local vehículos de tracción humana Antioquia 2018.

Por:

Daniel Ramírez Ramírez

Tecnología electromecánica

Asesor:

Ing. Sebastián Vélez García. Msc.

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

19 octubre de 2018

RESUMEN

Al momento de realizar un análisis aerodinámico a un vehículo de tracción humana (VTH), es de vital importancia seguir una serie de pasos que llevarán a unos resultados, que podrán ser analizados en pro de mejorar las condiciones y la eficiencia aerodinámica del mismo. Inicialmente, se realizó una consulta en la literatura para conocer todo lo relacionado con VTH's a nivel global; herramientas a usar en el software ANSYS y las variables indican los resultados al final del trabajo (fuerza de arrastre y descendente y coeficiente aerodinámico).

Luego de tener los conocimientos teóricos pertinentes, se dio paso a realizar el modelo CAD en el software Solid Edge, donde fue necesario realizar ciertas simplificaciones en la geometría, con el fin de evitar problemas al momento del mallado y retrasos en la simulación fluido-dinámica. El modelo CAD terminado fue exportado al software Design Modeler de ANSYS en donde se le realizó una operación booleana con el fin de unir todas las piezas en una sola, para luego realizarle un cercamiento a la geometría, con el fin de simular las medidas de un túnel de viento.

Teniendo el modelo CAD terminado, es momento de pasar al mallado, realizado con la herramienta Mesh de ANSYS. En este paso fue necesario buscar el método más adecuado para mallar el VTH. Según lo estudiado en la literatura, se decide escoger el método tetraédrico con parche independiente, ya que este método permite mejores resultados en geometrías que no son muy limpias, además, fue el método que mejor calidad de mallado tuvo, arrojando métricas aceptables para la simulación.

Con el VTH mallado, se inicia la simulación fluido-dinámica, la cual está dividida en 3 momentos importantes. El primero, es el pre-procesamiento, donde se configuran todos los parámetros a tener en cuenta durante la simulación, tales como; las condiciones de frontera; el método turbulencia escogido, que en este caso fue el k-omega (SST); las velocidades del fluido; entre otras variables. El segundo, es la solución de la simulación donde se resuelven muchísimas ecuaciones diferenciales y métodos numéricos para arrojar los resultados necesarios. Finalmente, el tercer momento es el post-procesamiento, donde es posible analizar todos los resultados de la simulación fluido-dinámica. En este caso se analizaron contornos de velocidad y presión, líneas de corriente y vectores de velocidad. Así mismo, fueron analizadas las fuerzas de arrastre y descendente generadas sobre el VTH, y finalmente con todos los anteriores resultados, generar el coeficiente aerodinámico del VTH, para poder ser comparado con otros vehículos comerciales.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradezco inicialmente al profesor y asesor Sebastián Vélez, ya que fue la persona que me ayudo con la idea de la realización de este proyecto, el cual me deja muchos nuevos conocimientos a nivel teórico y práctico para mi presente como estudiante y para mi futuro como trabajador. Agradezco también al docente Diego Hincapié, por permitirme usar el laboratorio de modelado, con el fin de utilizar el software ANSYS, componente principal para la realización de este proyecto. Finalmente, quiero agradecer a mi familia, mi novia y mis jefes, por el apoyo y la paciencia que me tuvieron a lo largo del desarrollo de este trabajo. Muchas gracias a todos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

VTH: Vehículo de Tracción Humana.

CAD: Computer-Aided design. (Diseño Asistido por computadora).

CFD: Computational Fluid Dynamics. (Dinámica de fluidos computacionales).

C_D : Coeficiente aerodinámico o de arrastre.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. OBJETIVOS.....	10
1.1.1. General.....	10
1.1.2. Específicos.....	10
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. Vehículos de tracción humana	12
2.2. ANSYS.....	17
2.2.1. Mallado en ANSYS (Mesh)	17
2.2.1.1. Método de mallado	17
2.2.1.1.1. Mallado tetraédrico.....	18
2.2.1.1.2. Mallado hexaédrico.....	18
2.2.1.2. Mallado de cuerpos múltiples	19
2.2.1.3. Controles globales de mallado.....	19
2.2.1.3.1. Defaults	19
2.2.1.3.2. Calibración (sizing).....	19
2.2.1.4. Calidad de mallado	22
2.2.1.5. Independencia de malla.....	23
2.2.2. CFD.....	24
2.2.2.1. CFX-Pre.....	25
2.2.2.2. CFX-Solución	25
2.2.2.3. CFX-Post	25
2.2.2.4. Modelos de turbulencia.....	25
2.3 Variables aerodinámicas:.....	27
2.3.1 Fuerza de arrastre.....	27
2.3.2 Fuerza descendente (sustentación inversa)	27
2.2.3. Coeficiente de arrastre	28
3. METODOLOGÍA.....	29
3.1. Modelado CAD	29

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2.	Discretización.....	33
3.2.1.	Mallado	33
3.2.2.	Estudio de independencia de malla.....	34
3.3.	Simulación en CFD-CFX	36
3.3.1.	CFX-Pre (Pre-procesamiento)	36
3.3.2.	CFX-Post (Post-procesamiento)	38
3.4.	Coeficiente de arrastre (<i>CD</i>).....	41
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
4.1.	Vectores de velocidad.....	43
4.2.	Líneas de corriente	46
4.3.	Contorno de velocidad.....	48
4.4.	Contorno de presión.....	50
4.5.	Fuerza de arrastre y descendente (sustentación inversa).....	52
4.5.1.	Fuerza de arrastre	53
4.5.2.	Fuerza descendente (sustentación inversa)	54
4.6.	Coeficiente de arrastre (<i>CD</i>).....	55
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	58
5.1	Conclusiones	58
5.2	Recomendaciones.....	59
5.3	Trabajo futuro.....	59
	REFERENCIAS	60

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Análisis aerodinámico en vehículos de tracción humana. A) Bicicleta tradicional con manubrio aerodinámico B) VTH completamente optimizado. C) Pruebas aerodinámicos en túnel de viento.....	13
Figura 2 Montaje VTH para pruebas experimentales. A) Base soporte VTH. B) Montaje VTH en túnel de viento	14
Figura 3 VTH's comparados experimentalmente por Alam et al. A) VTH con cubierta (Glyde). B) VTH Magnum. C) VTH SLX	14
Figura 4 Modelo CAD de la cubierta propuesta por Alam et al.	15
Figura 5 Resultados de simulaciones aerodinámicas obtenidas por Alam et al. A) Líneas de corriente sobre la cubierta empleada. B) Vectores de velocidad en plano medio de la cubierta.....	15
Figura 6 Esquematación dirección tipo "Tilting". A) Girando a la derecha. B) Girando a la izquierda.....	16
Figura 7 Disposiciones VTH. A) Disposición tipo Tadpole. B) Disposición tipo Delta.....	17
Figura 8 Tipos de Sizing.....	20
Figura 9 Tasa de crecimiento.....	21
Figura 10 Ángulo central de expansión.	22
Figura 11 Espectro de métricas de mallado	23
Figura 12 Ejemplo de estudio de independencia de malla.	24
Figura 13 Modelo de turbulencia SST combinando los otros dos modelos k-ε y k-ω.	26
Figura 14 VTH inicial, sin jaula antivuelco	30
Figura 15 Modelo CAD del VTH sin simplificaciones	30
Figura 16 VTH final.....	31
Figura 17 Modelo CAD simplificado	31
Figura 18 Cercamiento (enclosure) realizado en Design Modeler de ANSYS	32
Figura 19 Mallado en ANSYS. A) Mallado en corte transversal sin transparencia. B) Mallado sin transparencia. C) Acercamiento a VTH en mallado con transparencia. D) Mallado con transparencia.	34
Figura 20 Estudio de independencia de malla	35
Figura 21 Condiciones de frontera VTH. A) Inlet. B) Outlet. C) Walls túnel. D) Walls VTH.....	37
Figura 22 Posiciones VTH. A) VTH Derecho. B) VTH Giro máximo. C) VTH Inclinación de rueda 5°	41
Figura 23 Área frontal VTH en mm^2 . A) VTH Giro máximo. B) VTH Derecho. C) VTH Inclinación 5°.....	42

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Figura 24 Vectores de velocidad. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx. 45

Figura 25 Líneas de corriente. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx. 47

Figura 26 Contorno de velocidad. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx. 49

Figura 27 Contorno de presión VTH Giro máximo. A) Vista frontal. B) Vista posterior. 52

Figura 28 Contorno de presión. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx. 51

Figura 29 Fuerza de arrastre vs Velocidad del VTH 54

Figura 30 Fuerza descendente vs Velocidad VTH. 55

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos del estudio de independencia de malla 35

Tabla 2 Fuerzas de arrastre y descendente VTH para cada velocidad y posición..... 53

Tabla 3 Coeficiente de arrastre 56

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en Colombia, es necesario empezar a desarrollar e implementar otros métodos de transporte que sean amigables con el medio ambiente, ya que los índices de contaminación día a día siguen creciendo en las principales ciudades y especialmente en Medellín, donde cada vez es más recurrente la implementación de medidas drásticas en pro de reducir la contaminación de nuestro aire. Durante el desarrollo del semillero de Electromecánica en el periodo 2018-1, se ha decidido y se ha trabajado en la creación de un vehículo de tracción humana (VTH) para la participación de la competencia interuniversitaria realizada y organizada por la Universidad de Antioquia, la cual tiene como fin, aparte de encontrar la universidad con el mejor VTH, empezar a concientizar a los estudiantes del uso de medios de transporte amigables con el medio ambiente.

Con el fin de lograr una mejor participación en el próximo concurso interuniversitario de VTH's, se ha decidido realizarle un análisis aerodinámico al VTH del ITM por medio de simulación computacional, para poder estudiar el efecto que tienen las diferentes fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo, para así lograr encontrar las falencias en cuestión estructural, que hacen que el vehículo sea menos eficiente aerodinámicamente. Con este análisis, se pretende analizar el VTH respecto a la fuerza de arrastre y la fuerza descendente (sustentación inversa) que se generan a la velocidad máxima y mínima promedio, que puede alcanzar dicho vehículo. Así mismo, se pretende analizar los resultados arrojados por la simulación aerodinámica, esto con el fin de eventualmente, realizar modificaciones estructurales que permitan mejorar la eficiencia del VTH, generando así una mayor probabilidad de mejores tiempos durante las diferentes pruebas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. General

Analizar el comportamiento aerodinámico de un vehículo de tracción humana que participó en la competencia local de vehículos de tracción humana Antioquia 2018, lo anterior a distintas velocidades por medio de simulaciones fluido dinámicas en el software ANSYS.

1.1.2. Específicos

- Consultar la literatura para definir los modelos de turbulencia y las condiciones de frontera de las simulaciones.
- Generar el modelo CAD del vehículo de tracción humana, y su correspondiente volumen de fluido.
- Realizar el estudio de independencia de malla para las simulaciones fluido-dinámicas.
- Analizar el comportamiento aerodinámico del vehículo de tracción humana, por medio de simulaciones aerodinámicas.

En el marco teórico, se evidencia toda la información teórica pertinente, para el buen entendimiento del estudio aerodinámico, por tal motivo, se podrá observar toda la teoría acerca de los VTH's como tal, su historia, características y sus usos. Así mismo, información teórica acerca del software ANSYS usado para la realización de toda la simulación, información acerca del mallado, tal como el procedimiento llevado a cabo para realizar el estudio de independencia de malla y la razón por la cual se escogió el método de mallado utilizado. También se presenta información acerca de los 3 procesos llevados a cabo en el CFX (Pre-procesamiento, solución y post-procesamiento) y la finalidad de estos respecto a la simulación. Para llegar a los resultados esperados, es necesario también tener la información teórica necesaria para entender las variables que saldrán de la simulación (Fuerza de arrastre y descendente), así mismo, del coeficiente de arrastre y de cómo es el proceso para obtenerlo con respecto a las diferentes velocidades y posiciones del VTH.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la sección de metodología, se puede evidenciar todo el proceso que se llevó a cabo durante la simulación, tanto para la configuración inicial, como para los resultados finales. Inicialmente se habla acerca del proceso que se siguió para obtener el modelo CAD y de cómo fue editado para su siguiente proceso. Luego, se puede observar el proceso de mallado y de cómo este fue realizado y bajo que parámetros. Además, también se analiza el paso a paso seguido en la simulación CFX como tal, como fue su configuración inicial, que parámetros fueron pertinentes a la hora de correr la simulación y como fue la obtención de los resultados luego de simular. También es importante dejar claridad acerca de cómo se lograron obtener las variables a medir (fuerza de arrastre y descendente) y de cómo se obtuvieron los diferentes coeficientes de arrastre para cada posición y velocidad del VTH.

En la sección resultados, se puede observar la parte más importante del trabajo, ya que es donde están alojados todos los resultados finales de cada proceso que se llevó a cabo anteriormente. Inicialmente, se presentan los resultados de la simulación por medio de diferentes variables que fueron analizadas en el Pre-procesamiento, tales como vectores de velocidad, líneas de corriente, contorno de velocidad y contorno de presión. Dichas variables serán analizadas detalladamente en pro de conocer los cambios aerodinámicos presentados en cada uno de los casos. Además, será posible analizar las variables de fuerza de arrastre y descendentes mediante tablas y gráficos que permitan compararlas visualmente, así mismo, poder sacar una única ecuación exacta, que permita conocer la fuerza de arrastre o descendente en cualquier velocidad y cualquier posición del VTH, todo esto sin tener que repetir el proceso de simulación.

Finalmente, en la sección final, se evidencian las conclusiones de este proyecto, el cual fue realizado en pro de mejorar la eficiencia aerodinámica del VTH, y adicionalmente, se expresarán todas las posibilidades de mejoras al VTH. Así mismo, será posible evidenciar el trabajo futuro propuesto para este proyecto, el cual tiene una gran proyección a futuro.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Inicialmente es de vital importancia conocer toda la teoría que rodea el estudio aerodinámico de cualquier elemento en el software ANSYS, así mismo, es importante saber la historia y el desarrollo que han tenido los vehículos de tracción humana (VTH's) a través de los años, todo esto con el fin de poder entender toda la metodología que se realizó en el análisis aerodinámico realizado al VTH.

2.1. Vehículos de tracción humana

Las bicicletas han sido producidas desde hace muchos años sin grandes cambios en su funcionalidad, pero con grandes cambios en su diseño que han afectado la velocidad máxima que se alcanza conduciéndolas; para estos cambios es de suma importancia el conocimiento en aerodinámica aplicada. Los vehículos de tracción humana son una variación de las bicicletas comunes, en la que, inclusive, el piloto puede estar cubierto completamente por la cubierta del vehículo, según Kyle y Weaver (2004); la diferencia radica en que un vehículo de tracción humana, al que se le han hecho estudios y modificaciones aerodinámicas pertinentes, puede alcanzar velocidades de incluso el doble de las que pueden ser alcanzadas mediante la conducción de una bicicleta tradicional. Para cumplir y dar un mejor rendimiento al vehículo, es indispensable comprender que la resistencia aerodinámica es la mayor fuerza que entorpece la velocidad que se puede alcanzar, es por esto, que es importante el análisis del flujo de aire a través de la cubierta diseñada para el vehículo, nuevamente según Kyle & Weaver (2004). Teóricamente el poder para superar la resistencia del aire es equivalente al triple de la velocidad. En la Figura 1, es posible evidenciar tres casos considerados por los autores Alam, Chowdury, Guillaume, Yang, & Zimmer, (2013), en los cuales en el primero de ellos "Figura 1(A)", se posee una bicicleta en una posición normal de manejo con un manubrio aerodinámico, en la Figura 1(B) se observa un ciclista que cambia su posición reduciendo su resistencia con respecto del aire en un 20%, y finalmente vemos en la Figura 1(C) un VTH completamente desarrollado y optimizado en el cual se obtiene una reducción en el arrastre aerodinámico de un 95%, por su alta eficiencia aerodinámica, resultado de diferentes análisis y desarrollos.

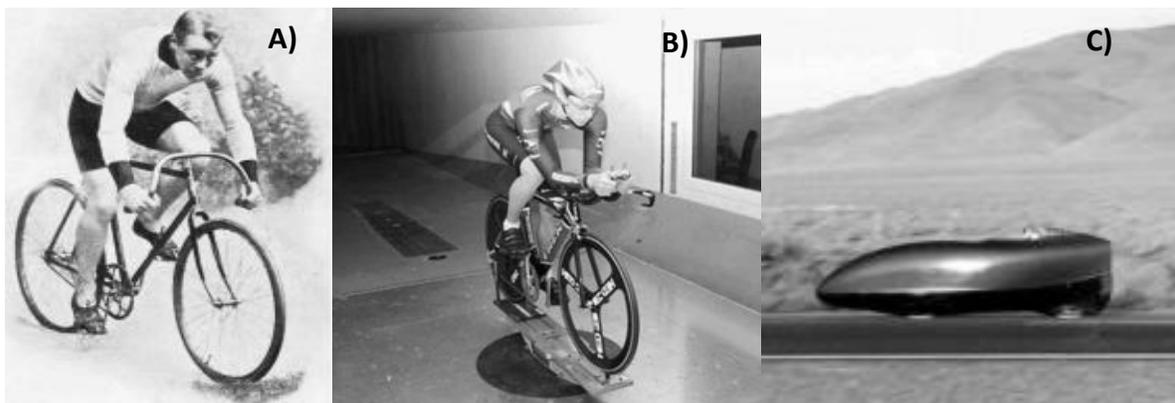


Figura 1 Análisis aerodinámico en vehículos de tracción humana. A) Bicicleta tradicional con manubrio aerodinámico B) Pruebas aerodinámicas en túnel de viento. C) VTH completamente optimizado. Alam et al. (2013)

Experimentalmente, es posible realizar análisis aerodinámicos por medio de los túneles de viento que, por lo general, son muy usados por los grandes equipos y marcas de automovilismo y motociclismo a nivel mundial. Cabe resaltar, que este proceso por lo general solo lo pueden costear grandes equipos y marcas, ya que es costosa su implementación; por esto, se buscan opciones alternas para ahorrar costos, como el análisis aerodinámico con un modelo a escala, o las simulaciones aerodinámicas, como lo menciona el autor Camúñez Llanos (2014). Si se dispone de los recursos, sería de gran ayuda y soporte la realización de pruebas experimentales en túnel de viento, como la realizaron en el estudio de Alam et al. (2013), en el cual se utilizó un túnel de viento con 3m de ancho, 2m de alto y 9m de largo, para realizar una prueba experimental aerodinámica que pudiera arrojar resultados de los diferentes tipos de fuerzas y de momentos. Esta prueba se realizó con vehículos a escala 1:2 y con un sensor de fuerzas JR-3. Las velocidades promedio que se manejan en los VTH son entre 30 km/h y 35 km/h. En la investigación de Alam, Silva, & Zimmer (2012) se puede evidenciar que por medio de estas pruebas de túnel de viento, también es posible entrar a utilizar los resultados obtenidos para el aprovechamiento y el mejoramiento del VTH. Dichos resultados hacen referencia a la posición más eficiente aerodinámicamente del asiento del conductor, carcasa o cubierta del vehículo, visores, cubiertas de rueda, entre otros elementos que, por medio del análisis de túnel de viento realizado en dicha investigación, puede servir de referencia para este proyecto. En la *Figura 2(A)* se puede evidenciar la base donde fue puesto el VTH propuesto por Alam et al. (2013) para que no se moviera durante la prueba, y en la *Figura 2(B)*, se puede ver el VTH dentro del túnel de viento para sus respectivas pruebas. Luego, en la *Figura 3* se pueden apreciar 3 diferentes modelos de VTH a los cuales se les realizaron las mismas pruebas en túnel de viento y arrojaron diferentes resultados. Según el estudio de Alam et al., (2013) se

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

evidencia que el vehículo más eficiente aerodinámicamente es el Glyde de la *Figura 3(A)*, que tiene la cubierta del chasis y las cubiertas de rueda, mostrando así, claramente, que estos elementos reducen considerablemente la resistencia al aire, mientras que el VTH Magnum mostrado en la *Figura 3(B)* y el VTH SLX mostrado en la *Figura 3(C)*, tienen mucha más resistencia al aire, por el hecho de no tener cubiertas ni otros elementos que reduzcan el arrastre.



Figura 2 Montaje VTH para pruebas experimentales realizado por Alam et al. (2012). A) Base soporte VTH. B) Montaje VTH en túnel de viento.



Figura 3 VTH's comparados experimentalmente por Alam et al., (2012). A) VTH con cubierta (Glyde). B) VTH Magnum. C) VTH SLX.

Para el análisis aerodinámico del vehículo de tracción humana de este trabajo, para participar en la competencia interuniversitaria de VTH, únicamente será posible entrar a realizar dichos análisis por medio de simulaciones computacionales, las cuales ahorran muchos recursos, ya que solo es necesario el buen manejo de un programa de simulaciones aerodinámicas. En el caso nuevamente de la investigación de Alam et al. (2013) se realizó inicialmente el modelo CAD, el cual se ilustra en la *Figura 4*, para posteriormente importar dicho modelo al programa de simulación aerodinámicas usado en esta caso, ANSYS. Por medio de esta simulación y trabajando bajo los modelos de turbulencias k-omega y k-epsilon, es posible determinar diferentes factores aerodinámicos, los cuales serán de gran ayuda para determinar las fuerzas y los momentos aerodinámicos en el vehículo. Dichas simulaciones las podemos ver evidenciadas en la *Figura 5(A)* donde se muestran las líneas de corriente sobre la cubierta empleada, y en la *Figura 5(B)* se muestran los vectores de velocidad en el plano medio de la cubierta, dichos análisis al VTH se evidencian en el estudio de Alam et al., (2013). Dentro de las diferentes investigaciones anteriormente citadas

podemos deducir que la magnitud de la fuerza de arrastre varía significativamente con modelos de perfiles físicos, tales como extrusiones, alerones, tomas de aire, etc. los cuales pueden ayudar a reducir la fuerza de arrastre, luego de realizar los respectivos análisis y simulaciones aerodinámicas.

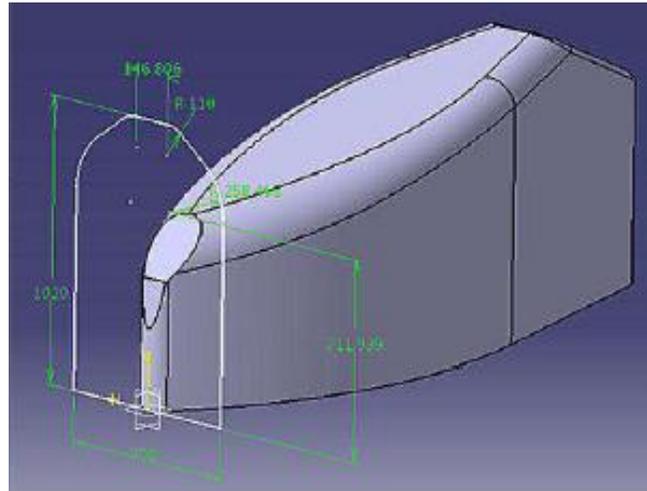
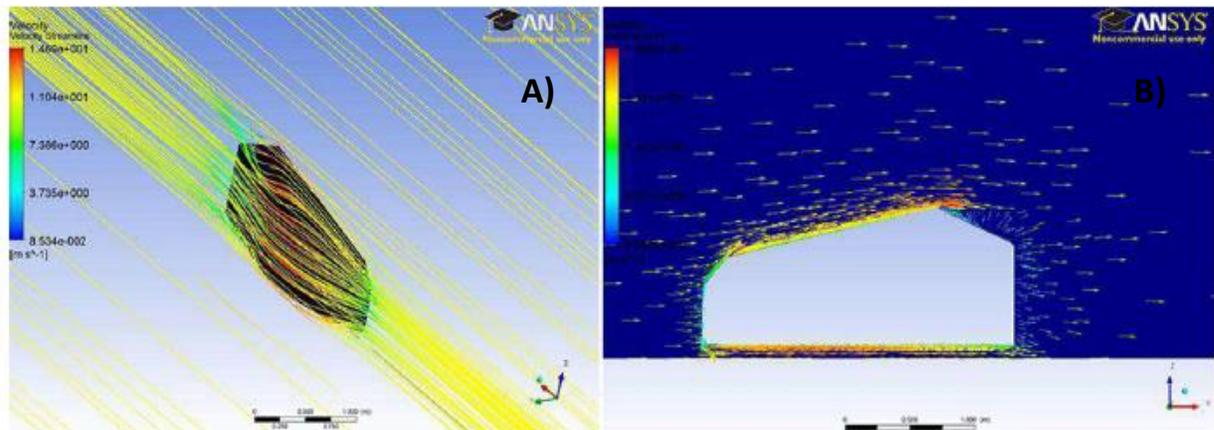


Figura 4 Modelo CAD de la cubierta propuesta por Alam et al., (2013).



A) Líneas de corriente sobre la cubierta empleada.

B) Vectores de velocidad en el plano medio de la cubierta.

Figura 5 Resultados de simulaciones aerodinámicas obtenidas por Alam et al., (2013). A) Líneas de corriente sobre la cubierta empleada. B) Vectores de velocidad en plano medio de la cubierta.

En materia estructural, se pueden analizar diferentes componentes del VTH los cuales podrían mejorar significativamente la eficiencia y estabilidad del VTH. En este caso citamos el estudio realizado por Rojas Camargo (2015), el cual se refiere a un cambio estructural basado en la dirección del vehículo, en el que es posible la inclinación de las ruedas

generando así una mayor estabilidad y una mayor velocidad al tomar las curvas, teniendo en cuenta que las velocidades promedio del estudio fueron entre 15 y 22 km/h. En la *Figura 6*, se puede ver el funcionamiento del sistema “tilting”, el cual funciona gracias a una junta articulada con bisagra, donde, dos bielas conectan el balanceador con las horquillas oscilantes traseras, y mediante la rotación del balanceador se obtiene un movimiento ascendente y descendente. A partir del estudio de Rojas Camargo (2015) se tendrán las bases para el desarrollo del VTH de este trabajo el cual tendrá un sistema “tilting” pero ubicado en la parte delantera.

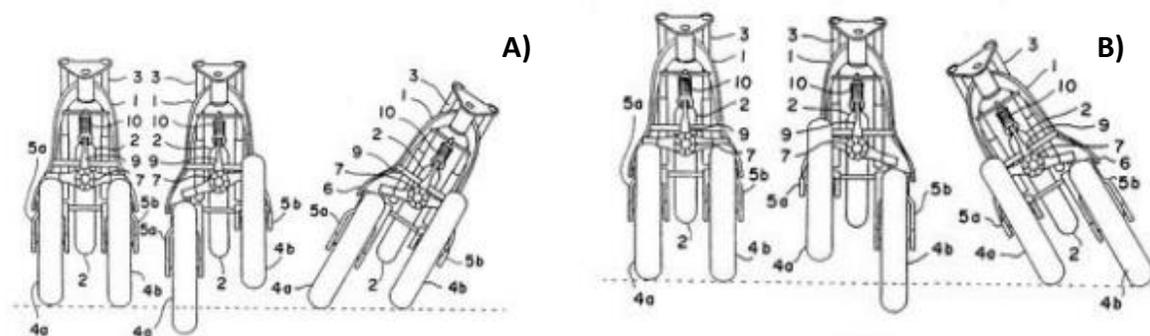


Figura 6 Esquematación dirección tipo “Tilting” propuesta por Rojas Camargo (2015) . A) Girando a la derecha. B) Girando a la izquierda.

Así mismo, a nivel estructural, es importante mencionar que este tipo de VTH, normalmente utilizan tres ruedas las cuales poseen dos tipos de disposiciones según el estudio de Patiño Molina (2011); tipo “Delta”, con una llanta delantera y dos llantas posteriores; y tipo “Tadpole”, la cual posee dos llantas delanteras y una trasera. La principal ventaja de esta última (Tadpole) si se le compara con la primera disposición, es la mayor estabilidad que presenta a la hora de tomar las curvas, haciendo más eficiente y rápido el VTH trabajado.

En la *Figura 7*, podemos observar los dos tipos de disposiciones propuestas por Patiño Molina (2011) en su estudio, siendo la *Figura 7(A)*, la tipo “Tadpole”, y la *Figura 7(B)*, la tipo “Delta”.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

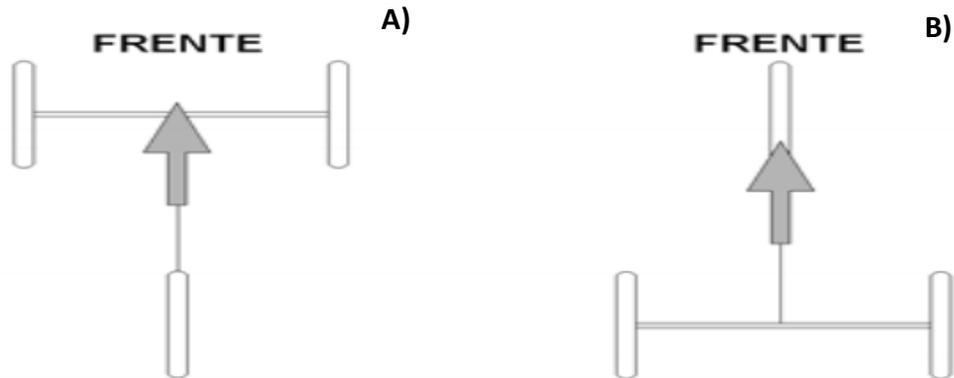


Figura 7 Disposiciones VTH propuestas por Patiño Molina (2011) . A) Disposición tipo Tadpole. B) Disposición tipo Delta.

2.2. ANSYS

ANSYS es una plataforma que está compuesta de diferentes programas (software) de ingeniería para realizar simulaciones de todo tipo. Este proyecto está enfocado en saber la teoría de los software que utilizaremos para nuestra simulación, los cuales son; Design Modeler, en el cual es posible realizar todo tipo de geometrías y modelados CAD; Meshing, donde se realiza todo el proceso de mallado al elemento a trabajar; y CFX, el cual es el encargado de realizar toda la simulación como tal y requiere 3 pasos principales que son, pre-procesamiento, solución y post-procesamiento. A continuación, se podrá observar toda la información pertinente que se debe tener clara acerca de ANSYS.

2.2.1. Mallado en ANSYS (Mesh)

2.2.1.1. Método de mallado

El método de mallado a escoger depende de la física, la geometría o los recursos. El mallado podría requerir solo un método o una combinación de ellos. La siguiente información se tomó de Meshing (2016a).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.1.1.1. Mallado tetraédrico: Tiene como ventaja con respecto al hexaédrico, que es mucho más fácil realizar el mallado en estructuras más complejas. La calidad de la malla será más fácil de lograr con el método tetraédrico. Además, la conversión del método tetraédrico al hexaédrico es mucho más fácil, ya que hacerlo al contrario podría ser más problemático. Podemos distinguir 2 tipos de algoritmos disponibles para este método:

- **Parche conformado:** Utilizado para CAD's limpios o de alta calidad, y para superficies de mallado precisas. Todas las caras y sus límites son respetados y mallados. Su tamaño es definido por controles globales y/o locales. El refinamiento esta predeterminado basado en curvatura y proximidad. En este método los detalles se pueden observar tenidos en cuenta y capturados. Este método permite una tasa de crecimiento suave y permite inflación.
- **Parche independiente:** Usada para geometrías sucias y superficies de mallado de poca calidad. No es necesario tener conformadas las caras, bordes y vértices. La opción detalles contiene los controles de tamaño. El refinamiento esta predeterminado basado en curvatura y proximidad. Para las geometrías con deformación, es posible asignar la tolerancia a deformación, activar la opción de malla basada en deformación y asignar nombres para preservar la geometría. En este método los detalles son ignorados, permite tasa de crecimiento aproximada y permite inflación.

2.2.1.1.2. Mallado hexaédrico: Tiene como ventaja con respecto al tetraédrico, que se utilizan menos elementos y por ende su solución será más rápida y con mayor precisión. Con el método hexa, es posible apreciar que todos los elementos están en dirección del fluido, lo cual reduce mucho el error numérico. Un mallado con el método tetra puede llegar a tener 49000 celdas, mientras que ese mismo elemento con el método hexa puede tener solo 19000 celdas. Sin embargo, para utilizar el método hexa se necesita una geometría limpia y podría requerir la descomposición de la geometría. Podemos encontrar 3 tipos de algoritmos disponibles para este método:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Mallado Sweep (Barrido).
- Mallado multizona.
- Mallado automático.

2.2.1.2. Mallado de cuerpos múltiples: Este tipo de mallado, es utilizado cuando se requiere mallar el elemento parte por parte, esto permite agregarle un método diferente de mallado a cada parte.

- **Mallado selectivo:** Este se usa para definir el orden del mallado. Los cuerpos pueden ser mallados individualmente, pero se debe tener en cuenta que estos cuerpos mallados pueden afectar a sus cuerpos vecinos, aun así, el usuario es el que tiene el control. El mallado automático se puede usar en cualquier momento para mallar los cuerpos restantes.
- **Grabación de operación de mallado:** Es usado para grabar el orden del mallado para futuros usos. Esto es una opción que solo se puede aplicar cuando se hace el mallado selectivo.

2.2.1.3. Controles globales de mallado: Estos son usados para hacer ajustes generales de estrategias de mallado, las cuales incluyen funciones de calibración, inflación, suavidad, deformación, parámetros de entrada, mallado de ensamblado, etc.

2.2.1.3.1. Defaults: Podremos encontrar 5 opciones para preferencias físicas: mecánicas, mecánicas no lineales, electromagnéticas, CFD y explícita. Si se escoge CFD habrá 3 opciones para las preferencias de solución: Fluent, CFX y Polyflow.

2.2.1.3.2. Calibración (sizing):

- **Size function:** Controla el crecimiento y distribución del mallado en importantes regiones de mucha curvatura o cerca de superficies próximas. Tenemos 5 opciones: Adaptativo, proximidad y curvatura,

curvatura, proximidad, y uniforme. En la *Figura 8* se puede evidenciar la diferencia grafica entre los 3 tipos de sizing principales (Adaptativo, curvatura y proximidad).

- **Función de tamaño adaptativa:** Los bordes son mallados con la calibración de elementos global, luego los bordes son refinados por curvatura y proximidad 2D, y al final se genera la correspondiente cara y malla de volumen. La transición del tamaño de la celda es definida por la “transición”.
- **Función de tamaño curvatura:** Determina el tamaño del borde y de la cara basado en la curvatura normal del ángulo, lo que crea una malla superficial fina. La transición del tamaño de la celda es definida por la tasa de crecimiento.
- **Función de tamaño proximidad:** Controla la resolución de la malla en regiones de proximidad en el modelo, luego, se adapta al número especificado de elementos en los espacios reducidos. Un mayor número de celdas a través del espacio crea una malla de superficie más refinada. La transición del tamaño de la celda es definida por la tasa de crecimiento.

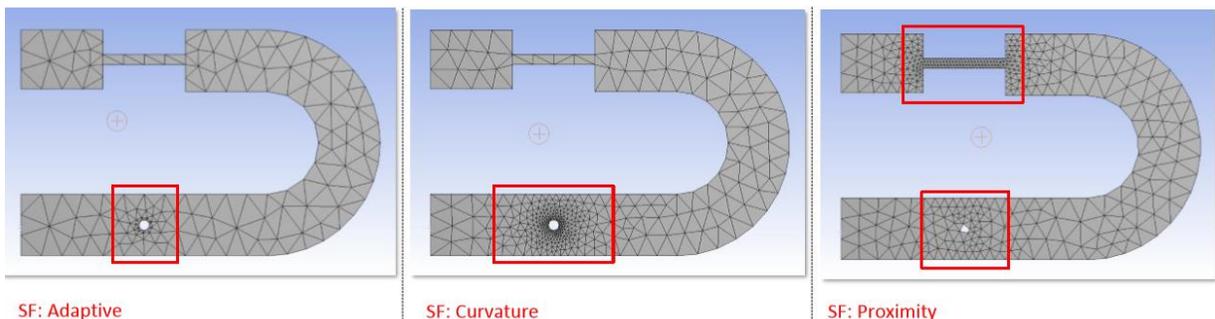


Figura 8 Tipos de Sizing, según Meshing (2016b).

- **Tamaño del elemento:** Esta opción solo está disponible cuando se usa la función de tamaño adaptativa, y será usado para el mallado de todos los bordes, caras y cuerpos.
- **Tamaño mínimo y máximo:** Esta opción solo está disponible para funciones de tamaño que no sean adaptativas. Las opciones que se tienen son: tamaño mínimo, tamaño máximo de cara y tamaño máximo. Esto determina el tamaño del mallado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Tasa de crecimiento (Growth Rate):** Esta opción solo está disponible para funciones de tamaño que no sean adaptativas, y aplica tanto para superficies como para dentro de los volúmenes. Algunos ejemplos de escalas son los siguientes, los cuales se pueden observar en la *Figura 9*.

GR = 1:1 = 1'263.297 celdas

GR = 1:2 = 587.026 celdas (este es el valor predeterminado)

GR = 1:3 = 392.061 celdas

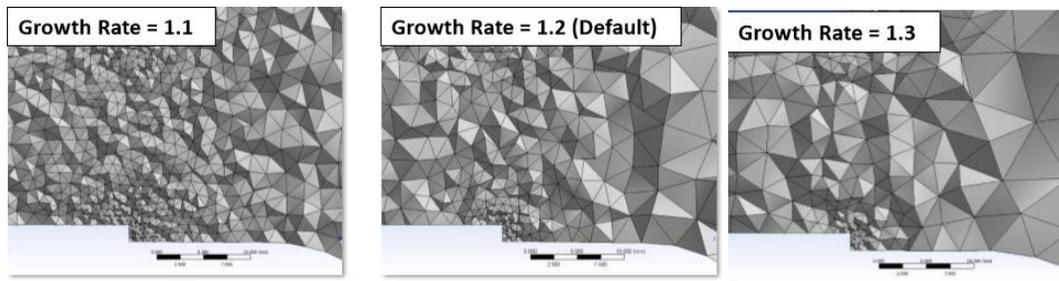


Figura 9 Tasa de crecimiento, según Meshing (2016b).

- **Transición:** Esta controla el índice al que crecen los elementos. Esta puede ser de dos tipos:
 - **Lenta:** Valor predeterminado para simulaciones CFD y explícitas, produce transiciones suaves.
 - **Rápida:** Valor predeterminado para simulaciones mecánicas y electromagnéticas, produce transiciones abruptas.
- **Ángulo central de expansión (span angle center):** Esta opción es la encargada de controlar la curvatura basada en la finura de los bordes. Tenemos 3 tipos principales, los cuales podemos observar en la
 - Grueso: 91° a 60°
 - Medio: 75° a 24°
 - Fino: 36° a 12°

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

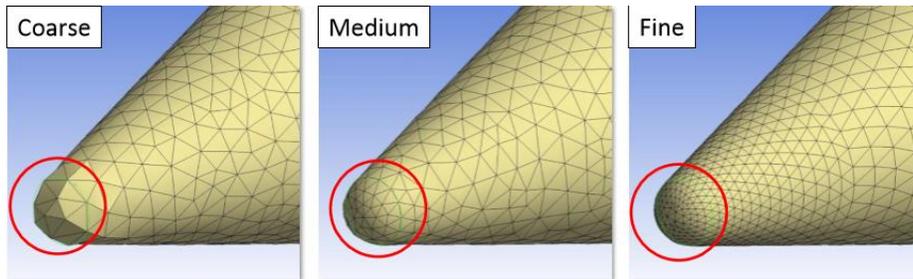


Figura 10 Ángulo central de expansión expuesto en Meshing (2016b)

2.2.1.4. Calidad de mallado: Una buena calidad de mallado está dada por las siguientes características, tomadas de Meshing (2016c):

- El criterio de calidad de mallado esté dentro del rango correcto (Calidad octogonal, oblicuidad, etc.)
- La malla sea válida para estudios físicos.
- Que la solución sea independiente de la malla.

Una malla de mala calidad puede causar dificultades de convergencia, malas descripciones físicas y soluciones difusas. El usuario siempre debe chequear la calidad de la malla y mejorarla si es necesario. Además, debe tener presente el tipo de modelo y solución que empleara antes de generar la malla.

Las estadísticas que se muestran en el programa son número de nodos y número de elementos de forma predeterminada, y adicionalmente da la opción de elegir una métrica de mallado para realizar la verificación de calidad de la malla. Esta métrica permite evidenciar el valor mínimo, promedio, máximo y la desviación estándar. Algunas de las métricas de mallado disponibles en ANSYS son:

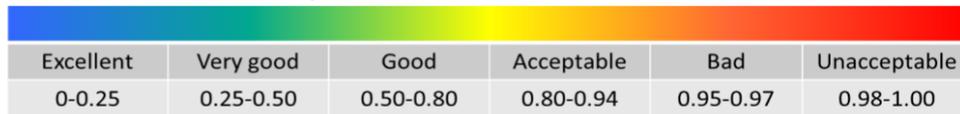
- Calidad del elemento
- Relación de aspecto
- Oblicuidad
- Calidad ortogonal
- Desviación paralela

Las métricas más usadas en CFX son la oblicuidad y la calidad ortogonal, y se recomienda que dichas métricas no sean: baja para la calidad ortogonal, ni alta para la oblicuidad. Generalmente se debe tratar de mantener un mínimo

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de calidad ortogonal de 0.1 o un máximo de 0.95 para la oblicuidad, aunque estas son directamente proporcionales cuando alguna de las dos está dentro del rango positivo. La *Figura 11* nos muestra el espectro de las principales métricas usadas en CFX, con sus valores excelentes y sus valores deficientes.

Skewness mesh metrics spectrum



Orthogonal Quality mesh metrics spectrum



Figura 11 Espectro de métricas de mallado, según Meshing (2016c).

2.2.1.5. Independencia de malla: El estudio de independencia de malla hace referencia a la búsqueda de la malla más adecuada para su uso en la simulación, con respecto al número de elementos usados (cells) y a la variable a medir. Dicho proceso es necesario realizarlo con diferentes simulaciones, variando entre ellas la medida de cada elemento usado, para así luego de analizar los resultados por medio de un gráfico, obtener la malla cuyo porcentaje de diferencia frente a la siguiente o a la anterior, sea menor del 5%. En la *Figura 12*, podemos evidenciar un ejemplo en el cual se realizó un estudio de independencia de malla, el cual arrojó como resultado, que en la malla DP3 y DP4 hay solo un 2% de diferencia entre ellos, lo cual significa que cualquiera de las dos mallas pueden ser usadas para el trabajo, tal y como se evidencia en Meshing (2016c).

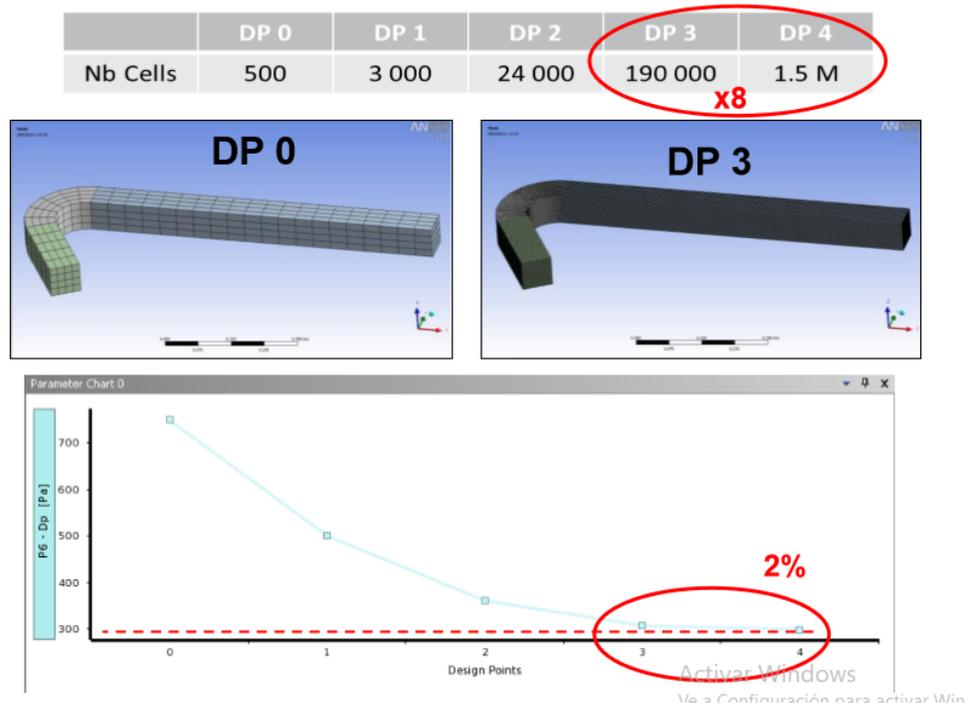


Figura 12 Ejemplo de estudio de independencia de malla, expuesto en Meshing (2016c).

2.2.2. CFD: Según Cfx (2016), Computational Fluid Dynamics (CFD), es la ciencia de predecir el flujo en diferentes tipos de fluidos; transferencia de calor y masa; y reacciones químicas y fenómenos relacionados. Para predecir estos tipos de fenómenos, CFD resuelve ecuaciones de conservación de masa, momento, energía, etc.

CFD provee información detallada del comportamiento de flujo de fluido tales como:

- Distribución de presión, velocidad, temperatura, etc.
- Fuerzas de elevación, arrastre (Flujos externos, aeroespacial, automotriz).
- Distribución de múltiples fases (Gas-líquido, gas-sólido, etc.)

CFD es usado en todas las etapas de procesos de ingeniería, tales como:

- Estudios conceptuales de nuevos diseños.
- Desarrollo detallado de producto.
- Optimización.
- Solución de problemas.
- Rediseño.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El análisis en CFD es un gran complemento para la realización de pruebas y experimentos reduciendo considerablemente el esfuerzo total y los costos requeridos para la experimentación y la adquisición de datos.

El análisis CFD requiere 3 importantes pasos, los cuales son; el Pre-procesado, la solución y el Post-procesamiento o resultados. Cada uno de estos pasos tienen gran importancia dentro del proceso completo de simulación.

2.2.2.1. CFX-Pre: El CFX-Pre es en donde se realizan todos los ajustes y configuración del modelo a trabajar. Es en este paso donde se debe escoger el tipo de modelo de turbulencia a trabajar, además de escoger el tipo de fluido con el que se quiere trabajar y las condiciones de frontera.

2.2.2.2. CFX-Solución: Luego de haber realizado la respectiva configuración, CFX-Solución es el encargado de realizar el proceso de simulación, resolviendo muchísimas ecuaciones de todo tipo para llegar a un resultado determinado. Cabe resaltar que este es el paso que toma más tiempo, y el que más poder computacional requiere. Dependiendo del mallado, del modelo de turbulencia escogido y de las condiciones de frontera, será el tiempo que demore la simulación.

2.2.2.3. CFX-Post: Luego de que la simulación haya finalizado, CFX-Post será el encargado de mostrar todos los resultados de la simulación. Este es el paso más importante de todo el proceso, ya que es en donde aparece cualquier tipo de resultado, por ejemplo, podemos añadir expresiones y/o variables para determinar algún tipo de dato, como una variable de fuerza. Además, es posible agregar y evidenciar contornos, vectores y/o líneas de corriente, de cualquier tipo de variable, tales como velocidad o presión.

2.2.2.4. Modelos de turbulencia: Según lo visto en Cfx (2016b), un gran número de modelos de turbulencia están disponibles, algunos para aplicaciones muy específicas, otros pueden ser aplicados a una amplia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

clase de fluidos con un grado razonable de confianza. Algunos de los modelos de turbulencia con los que cuenta CFX son:

- **K – E (k-épsilon):** Este modelo presenta una buena relación entre esfuerzo numérico y precisión computacional. Realiza buenas predicciones en muchos flujos de la ingeniería de interés. Este tipo de modelo no es adecuado para: Flujos con separación de límites de capa, flujos con cambios repentinos en la tasa de deformación, flujos en fluidos rotativos y flujos sobre superficies curvas.
- **K – ω (k-omega):** Al igual que el anterior modelo este presenta una buena relación entre esfuerzo numérico y precisión computacional, y ofrece muy buenas predicciones en muchos flujos de la ingeniería de interés. Este modelo tiene como ventaja respecto al anterior, en que es mejor para flujos de capa límite, tales como: Separación, transición, efectos bajos de Re, e impacto.
- **K-omega SST model (Shear Stress Transportation):** El rendimiento relativo de los modelos anteriores dependen de la región del flujo. El modelo k- ω funciona mucho mejor en flujos de capa límite, pero este modelo es muy sensible a las condiciones de flujo libre, mientras que el modelo k- ϵ , es relativamente insensible a dichas condiciones. El modelo SST supera las deficiencias de los anteriores modelos. Combina ambos modelos de acuerdo a la distancia desde el muro, previene la sobre-predicción de la viscosidad de los remolinos y mejora la predicción del inicio y grado de separación de las superficies suaves.

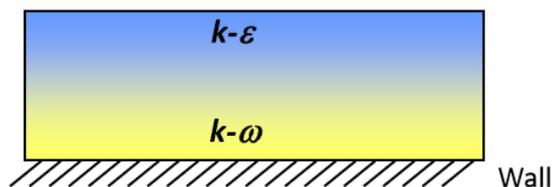


Figura 13 Modelo de turbulencia SST combinando los otros dos modelos k- ϵ y k- ω . (Cfx, 2016b)

Así mismo, este modelo predice muy bien el inicio y la cantidad de separación del flujo. El método k- ϵ estándar falla prediciendo la separación, mientras que el método SST previene esto.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3 Variables aerodinámicas:

2.3.1 Fuerza de arrastre: Según lo planteado en Antonio & Lozano (2006), el arrastre es la fuerza aerodinámica que opone el movimiento de un perfil a través del aire. Dicha fuerza es generada por la interacción y el contacto de un cuerpo sólido con un fluido (líquido o gas). Para que el arrastre sea generado, el cuerpo sólido debe estar en contacto con el fluido. Si no hay fluido, no hay arrastre. Otra consideración de la formación de la fuerza de arrastre es que esta se origina por la diferencia en velocidad entre el objeto sólido y el fluido.

Hay muchos factores que afectan la magnitud de la fuerza de arrastre. La magnitud depende de la viscosidad del aire y de la magnitud relativa de las fuerzas viscosas al movimiento del flujo, expresado como el número de Reynolds. La magnitud de la fuerza de arrastre depende de condiciones en la capa límite. También se puede pensar en la fricción como resistencia aerodinámica al movimiento del objeto a través del fluido. Esta fuente de formación de fuerza de arrastre depende de la forma del objeto que atraviesa y se llama arrastre de forma.

2.3.2 Fuerza descendente (sustentación inversa): Tal y como se expresa en Antonio & Lozano (2006), desde el principio de las competencias de autos de carreras, los coches se han vuelto más y más rápidos. Ahora, la mayoría de los automóviles producen sustentación. Conforme la velocidad aumenta, la fuerza de sustentación aumenta y el coche se vuelve inestable. Para contrarrestar el problema de la sustentación, los autos de carreras modernos están diseñados para producir sustentación negativa. Estos dispositivos neutralizan la sustentación producida por el coche o crean de hecho sustentación negativa.

Hay varios métodos que se utilizan para reducir la sustentación o para crear fuerza hacia abajo. Los dispositivos disponibles más simples son un tipo de presas de aire delanteras e interceptores aerodinámicos traseros. Estos dispositivos tienen realmente varios efectos positivos. Al reducir el flujo del aire por debajo del vehículo, una presa de aire delantera reduce la resistencia del automóvil. Además, la presión también se reduce, lo cual ayuda a que la sustentación se reduzca en la parte de enfrente del coche. El interceptor aerodinámico trasero puede reducir la separación del flujo en la ventana posterior, lo cual reduce la resistencia del aire. También hace que aumente el flujo del aire por debajo del auto, lo cual promueve la generación de una fuerza hacia abajo en la parte posterior del coche, generando así mayor estabilidad en el vehículo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.2.3. Coeficiente de arrastre: De acuerdo a Jimenez, Paroush, & Ish-Horowicz (1997), en el estudio de fluidos, el coeficiente de arrastre es una cantidad adimensional que se usa para medir el arrastre o resistencia de un objeto en un medio fluido como el aire. Un coeficiente de arrastre bajo indica que el objeto tendrá menos arrastre aerodinámico o hidrodinámico. El coeficiente de arrastre está definido por:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho v^2 A}$$

Donde:

F_D : Es la fuerza de arrastre, que va en dirección del fluido.

ρ : es la densidad del fluido

v : Es la velocidad del fluido, y

A : Es el área de referencia.

El área de referencia depende de qué tipo de coeficiente de arrastre se esté midiendo. Para automóviles y muchos otros objetos, el área de referencia es el área frontal proyectada del vehículo. Esto no necesariamente corresponde al área de la sección transversal del vehículo, dependiendo de dónde se tome dicha sección.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Inicialmente, es necesario saber que, para realizar una simulación aerodinámica en ANSYS, se debe pasar por una serie de procesos, los cuales permitirán finalmente llegar a los resultados fluido-dinámicos. En este caso, se realizó primero el CAD del VTH en otro software llamado Solid Edge y luego se exportó dicha geometría al software ANSYS, dejando claro que dicha geometría CAD es posible realizarla también directamente en el ANSYS (Design Modeler). Posteriormente, es necesario realizar el estudio de mallado, el cual es considerado por muchas personas como un arte, ya que éste, tiene muchísimas maneras de realizarse y con diferentes métodos. Luego, se realizó la simulación fluido-dinámica en CFX, la cual arrojará todos los resultados que serán analizados posteriormente. Finalmente, fueron analizadas las variables de fuerza de arrastre y descendente (sustentación inversa), y el coeficiente aerodinámico del VTH.

Luego de tener todas las bases teóricas necesarias para entender todo el proceso de la simulación fluido-dinámica, a continuación, se presenta la metodología, en la cual estará condensada toda la información relacionada con el proceso que se siguió durante la simulación.

3.1. Modelado CAD: Inicialmente se partió de una condición la cual era un chasis, el cual se compró fabricado (chasis empleado por los triciclos de carga construidos por la empresa COLBIC). En función de dicho chasis, se empezó a trabajar en los demás componentes periféricos necesarios para llegar al VTH final, tales como, las ruedas, la barra de dirección, la jaula antivuelco, los pedales, el manubrio, el asiento, entre otros. Es de vital importancia saber que fue necesario la simplificación de la geometría del VTH al momento de realizar el modelado CAD en lugares donde la geometría era muy compleja, y podía complicar el proceso de mallado, esto en pro de simplificar los procesos tanto de mallado como de CFX. A continuación, en la *Figura 14* es posible evidenciar el VTH inicial, sin la jaula antivuelco, y en la *Figura 15* se puede evidenciar el mismo VTH modelado en CAD, pero en este caso sin las simplificaciones planteadas anteriormente, las cuales ayudarían en la optimización del VTH.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 14 VTH inicial, sin jaula antivuelco.

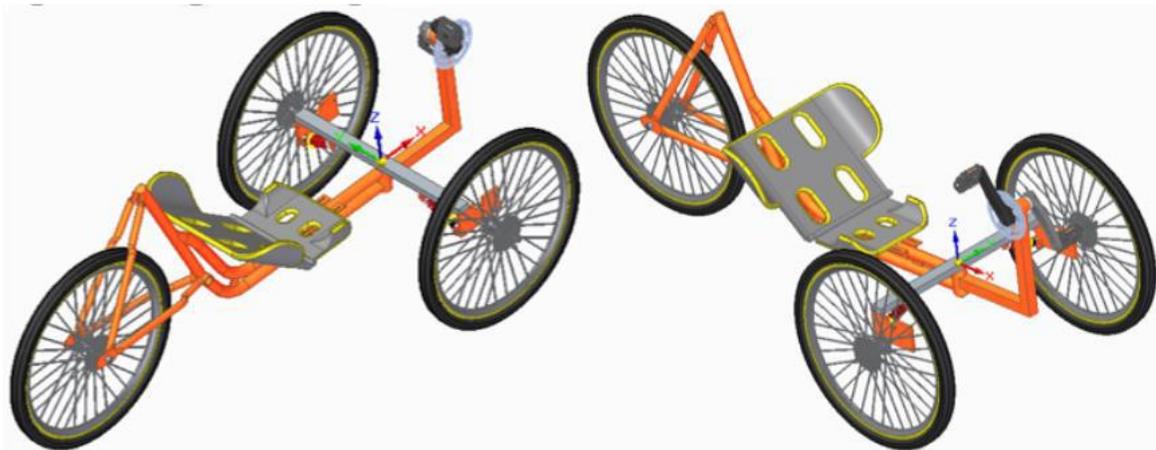


Figura 15 Modelo CAD del VTH sin simplificaciones.

Ahora, es necesario saber qué tipo de simplificaciones se realizaron en el modelo CAD del VTH final, el cual ya posee la jaula antivuelco y demás componentes periféricos que no estaban en el VTH inicial.

- Se simplificaron las ruedas, ya que los radios podrían generar problemas al momento del mallado, por tener una geometría con alto índice de complejidad. En el nuevo modelo CAD, las ruedas quedaron como si tuvieran cubiertas por ambos lados y fueran completamente compactas.
- Se simplificaron los pedales con sus respectivos platos de velocidad, ya que estos presentan normalmente una geometría compleja, la cual podría generar inconvenientes al momento del mallado. Su simplificación fue parecida a la de las ruedas, ya que se eliminaron las geometrías complejas y se compactaron con el fin de lograr una superficie plana y fácil de trabajar.

- Se simplificaron los amortiguadores, ya que su forma geométrica tipo resorte, puede causar problemas al momento del mallado, por esta razón se decide simplificar omitiendo la geometría tipo resorte, y se pone una geometría compacta con la misma forma geométrica del amortiguador.
- Se omitieron las levas de freno, la cadena, la pacha y tensores, por motivos de complejidad en su geometría que dificultaba el proceso del modelado CAD.

A continuación, en la *Figura 16* es posible evidenciar el VTH final, con la jaula antivuelco y demás componentes que le faltaban para su finalización. Luego, en la *Figura 17*, se puede ver el modelo CAD con sus respectivas simplificaciones en la geometría.



Figura 16 VTH final

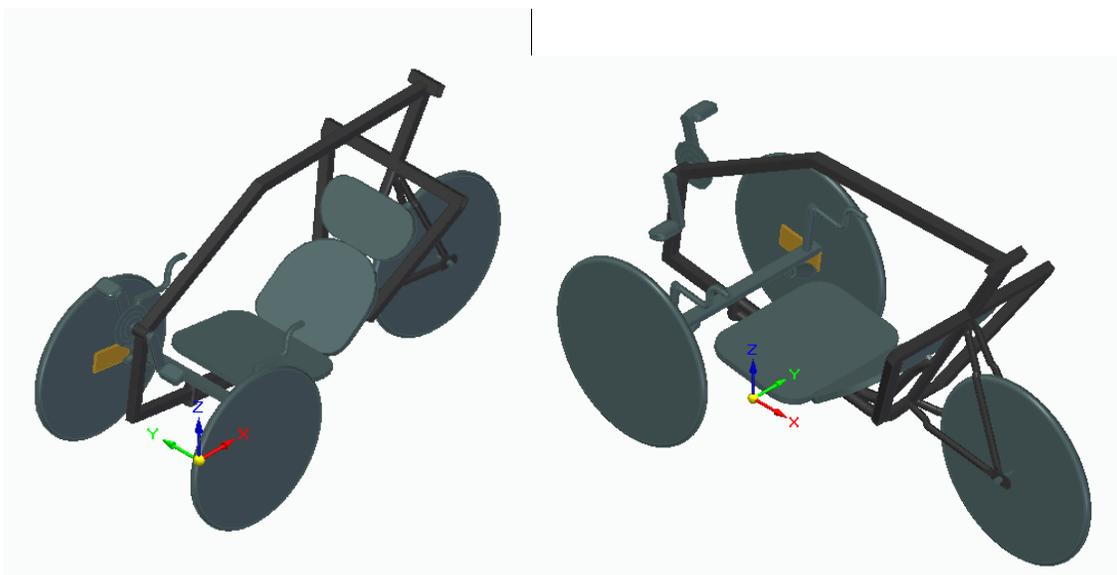


Figura 17 Modelo CAD simplificado

Adicionalmente, luego de exportar el modelo CAD al ANSYS, fue necesario realizarle un proceso adicional en el programa Design Modeler de ANSYS antes de realizar el mallado, esto con el fin de que el proceso de mallado fuera más preciso y más adecuado para el requerimiento. Inicialmente, fue necesario aplicarle una operación booleana al VTH, con el fin de unir todas las piezas de las que estaba constituido el VTH, en una sola pieza uniforme más fácil de trabajar. Luego, al modelo CAD previamente unificado se le aplicó un cercamiento (Enclosure) alrededor del VTH con las medidas del túnel de viento las cuales fueron 9m de largo, 2m de alto y 3 metros de ancho, esto con el fin de tratar de reflejar la misma situación real, pero a nivel computacional. Cabe resaltar que el VTH está completamente centrado con respecto al cercamiento. En la *Figura 18* se puede observar el cercamiento (enclosure) realizado al modelo CAD en el software Design Modeler de ANSYS.

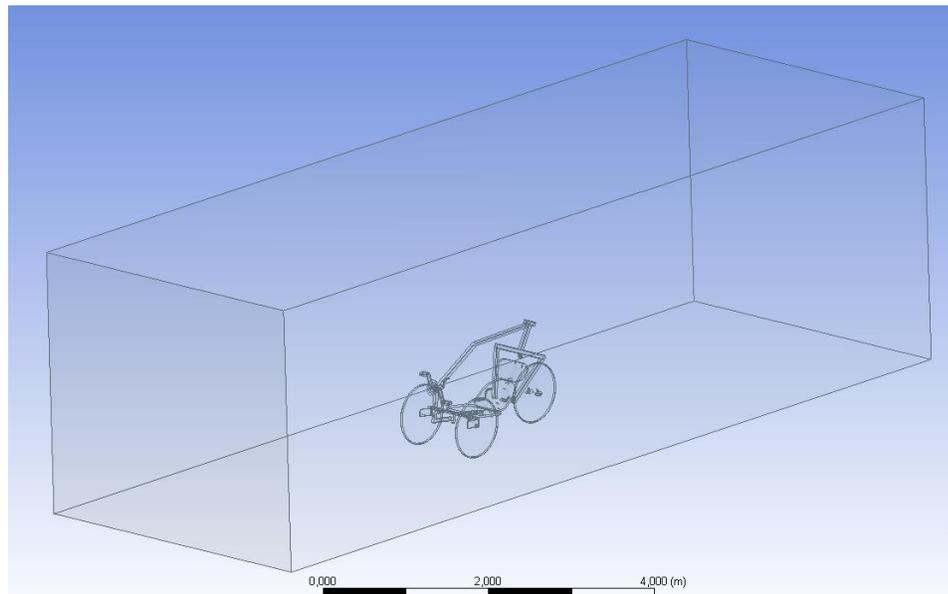


Figura 18 Cercamiento (enclosure) realizado en Design Modeler de ANSYS

Cabe resaltar, que las simulaciones aerodinámicas en muchas ocasiones es necesario realizarlas a nivel computacional únicamente, ya que para realizarlas de manera experimental se necesita de mucho presupuesto para recrear las condiciones reales a las que podría estar expuesto el vehículo, tales como el vehículo a escala real, túnel de viento, sensores especializados de velocidad, entre otros componentes necesarios para dicho proceso.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2. Discretización: Luego de tener el modelo CAD final con la geometría simplificada, se puede entrar a analizar la discretización del mismo. En este paso se dará a conocer el proceso que se siguió para determinar el método de mallado, así mismo, determinar cómo fue el análisis de independencia de malla y con qué criterios fue definido.

3.2.1. Mallado: Teniendo en cuenta la literatura estudiada en Meshing (2016a) acerca del mallado en ANSYS, y teniendo en cuenta también la geometría del modelo, Se puede concluir que el método más adecuado es el tetraédrico, ya que este método actúa mucho mejor en geometrías complejas. Inicialmente se intentó aplicar el método parche conformado tetraédrico, con el método de sizing por curvatura y proximidad, pero las métricas de mallado resultaron fuera del rango positivo para su uso. Por esta razón, se cambió el método a parche independiente tetraédrico con el mismo método de sizing por curvatura y proximidad y en esta ocasión las métricas de mallado si resultaron dentro del rango positivo para su uso. En esta ocasión se escogió la métrica oblicuidad para medir la calidad de la malla, la cual resulto ser de **0,94** siendo este el índice mínimo de aceptación según (Meshing, 2016c). En la *Figura 19* se puede observar el mallado realizado en el software Meshing de ANSYS. En la *Figura 19(A)*, se puede ver el mallado en corte transversal sin transparencia, el cual permite evidenciar la calidad del mallado cerca de las paredes del VTH y en su interior. En la *Figura 19(B)* se observa el mallado completo sin transparencia, en el cual es posible apreciar el tamaño de los elementos escogidos en el estudio de independencia de malla. En la *Figura 19(C)*, se aprecia el mallado en transparencia con un acercamiento al VTH, con el fin de poder apreciar el método y el sizing (curvatura y proximidad) aplicado al VTH. Y en la *Figura 19(D)* se puede ver el mallado con transparencia, el cual permite tener un panorama completo del mallado tanto en su exterior como en su interior.

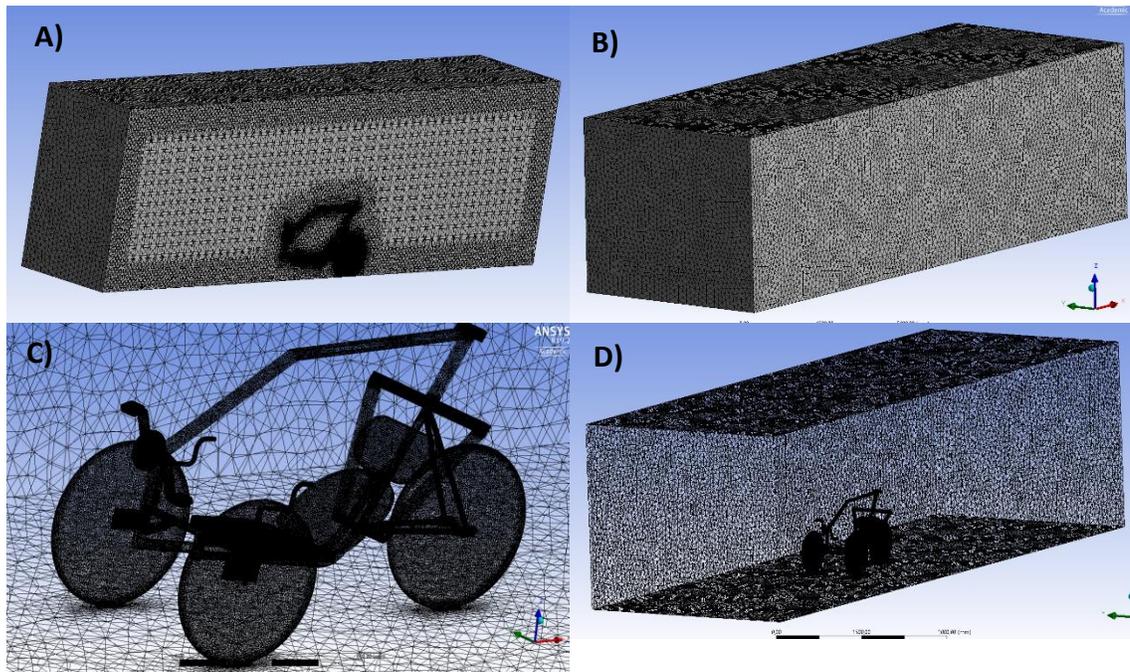


Figura 19 Mallado en ANSYS. A) Mallado en corte transversal sin transparencia. B) Mallado sin transparencia. C) Acercamiento a VTH en mallado con transparencia. D) Mallado con transparencia.

3.2.2. Estudio de independencia de malla: Luego de tener claro el método de mallado a utilizar, es importante definir la medida de los elementos, esto por medio de varias simulaciones en las cuales se varía el tamaño de los elementos, esto con el fin de encontrar un porcentaje de variación de menos del 5%. Según la literatura estudiada en (Meshing, 2016c) acerca de la independencia de malla, es necesario escoger una variable con la cual serán medidas y evaluadas dichas simulaciones. En este caso, la variable escogida para realizar la medición es la fuerza de arrastre que es arrojada en los resultados de CFD-Post que más adelante se presentan con más detalle. A continuación, se podrá observar la *Tabla 1* en la cual fueron tabulados los resultados para cada tamaño de elemento, con su número de elementos, fuerza de arrastre, y porcentajes de variación. Así mismo se presentan ilustrados dichos resultados en la *Figura 20* en donde es más fácil evidenciar los porcentajes de variación.

Tabla 1 Datos del estudio de independencia de malla

Tamaño del elemento. (mm)	# de elementos.	Fuerza arrastre (N)	% error relativo.	% error absoluto.
170	3'973.000	1,0865	-0,603787394	0,872713768
140	4'089.100	1,0931	1,128689055	1,485470244
110	4'175.200	1,0809	-0,249169435	0,352799183
80	4'281.800	1,0836	0,603472287	0,603472287
50	4'446.500	1,0771	0	0

Como se puede observar en la *Tabla 1*, los tamaños de elementos en los que hubo menos variación de la variable (fuerza de arrastre), fueron 110 y 80. Por esta razón se ha escogido el tamaño de elemento 110 para seguir trabajando durante todo el proceso, ya que tiene una variación porcentual con respecto al anterior de menos del 5%. En el *Figura 20*, se puede observar los resultados del estudio de independencia de malla graficados, con respecto a la fuerza de arrastre en el eje "Y" y número de elementos en el eje "X". Además, se puede verificar que entre los puntos "4'175.200" y "4'281.800" los cuales corresponden a 110 y 80 respectivamente, se tiene un margen de variación de menos del 5%.

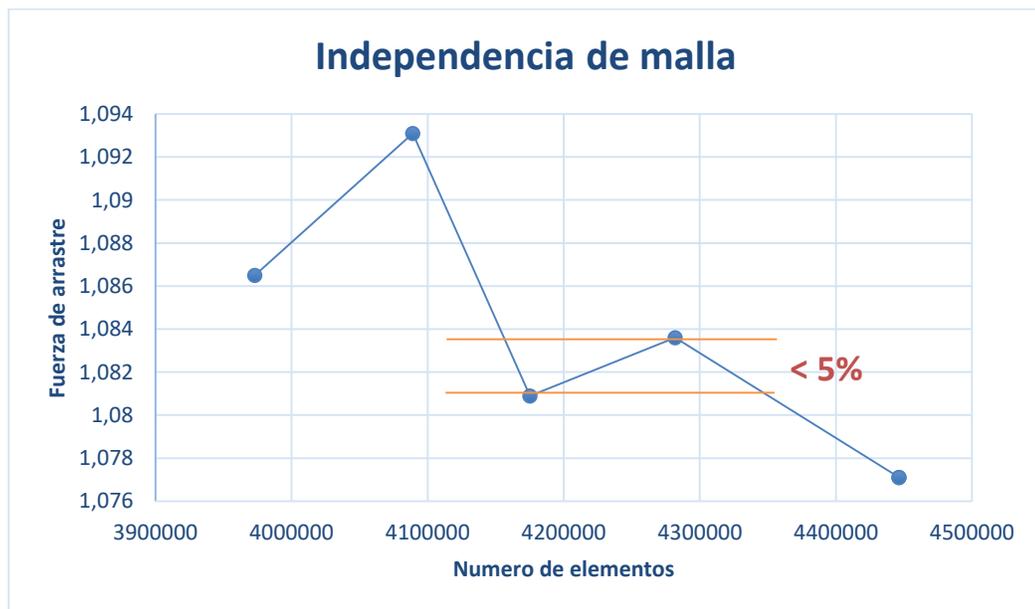


Figura 20 Estudio de independencia de malla

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.3. Simulación en CFD-CFX: Luego de tener claro todo lo relacionado con el mallado del VTH, podemos iniciar el proceso de simulación, el cual consta de 3 pasos, donde cada uno de ellos tiene una función importante en el desarrollo de la simulación. Antes que nada, es importante saber qué tipo de simulación se utilizara durante todo el proceso. En este caso, la simulación será monofásica estacionaria.

- **Simulación monofásica:** Se dice que es monofásica por ser únicamente de una fase. Tomando como referencia las fases del agua (sólido, líquido y gaseoso). En este caso únicamente se va a trabajar con un gas que sería el aire, el cual es posible utilizarlo a temperatura ambiente de 25°C, ya que no hay cambios de presión.
- **Simulación estacionaria:** Se refiere a que las velocidades con las que se realizará la simulación son constantes, requiriendo así menos capacidad computacional, ya que en este tipo de simulaciones el usuario es el que establece el paso de velocidad la cual sería constante y por ende la simulación tardaría menos en resolverse. Si se realizara por medio de simulación transitoria, esta toma mucho más tiempo ya que por defecto define un paso de velocidad muy pequeño (0,1 km/h aproximadamente), mientras que en este caso se realizarán varias simulaciones estacionarias con un paso de velocidad de 5km/h únicamente, lo cual hace más eficiente y rápido el proceso.

Dejando claro el tipo de simulación a utilizar, se empieza con el proceso de simulación con los siguientes pasos:

3.3.1. CFX-Pre (Pre-procesamiento): Inicialmente, es necesario conocer el modelo de turbulencia escogido para realizar la simulación de acuerdo a los modelos posibles para usar en el CFX. En este caso, se ha decidido usar el método k-omega SST (Shear Stress Transport), ya que este método corrige los errores y falencias que presentan los otros 2 modelos (k-ε y k-ω) combinando ambos modelos, generando así un solo modelo (k-omega SST) con las ventajas de cada uno los modelos ya mencionados. Con esto, se puede afirmar que este es el modelo más efectivo si se hace una relación con respecto al tiempo de computo, ya que este método requiere menos tiempo y capacidad computacional, a diferencia de otros que son más precisos, pero requieren mucho tiempo y capacidad computacional.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ahora, es importante definir las condiciones de frontera, las cuales serán las bases de la simulación. Para este caso, se definió una entrada (inlet), una salida (outlet), paredes del túnel (WallsTúnel) y paredes del VTH (WallsVTH). En la *Figura 21(A)*, se puede observar la frontera de entrada (Inlet), la cual es importante dentro de la simulación, ya que es por esta frontera por donde entrará el fluido hacia el VTH. Luego, en la *Figura 21(B)*, se puede observar la frontera de salida (Outlet), por donde sale el fluido analizado. En la *Figura 21(C)*, se encuentra la frontera de paredes del túnel (WallsTúnel), la cual cobra importancia, ya que es a través de esta región, por donde se transporta el fluido y choca con el VTH analizado. Finalmente, en la *Figura 21(D)*, observamos la frontera más importante de todas, las paredes del VTH (WallsVTH), en la cual es donde se analizan todas las fuerzas y cargas aerodinámicas arrojadas por la simulación. Es en esta frontera donde recae el fluido analizado y en donde se presentan los mayores cambios a nivel de velocidad y de presión.

Cabe resaltar, que el sentido de la gravedad en la simulación, fue aplicado en el sentido $-Z$ con un valor predeterminado de $9,8 \text{ m/s}^2$. La fase tomada fue el aire a 25°C que es la temperatura ambiente a la que normalmente estará sometido el VTH.

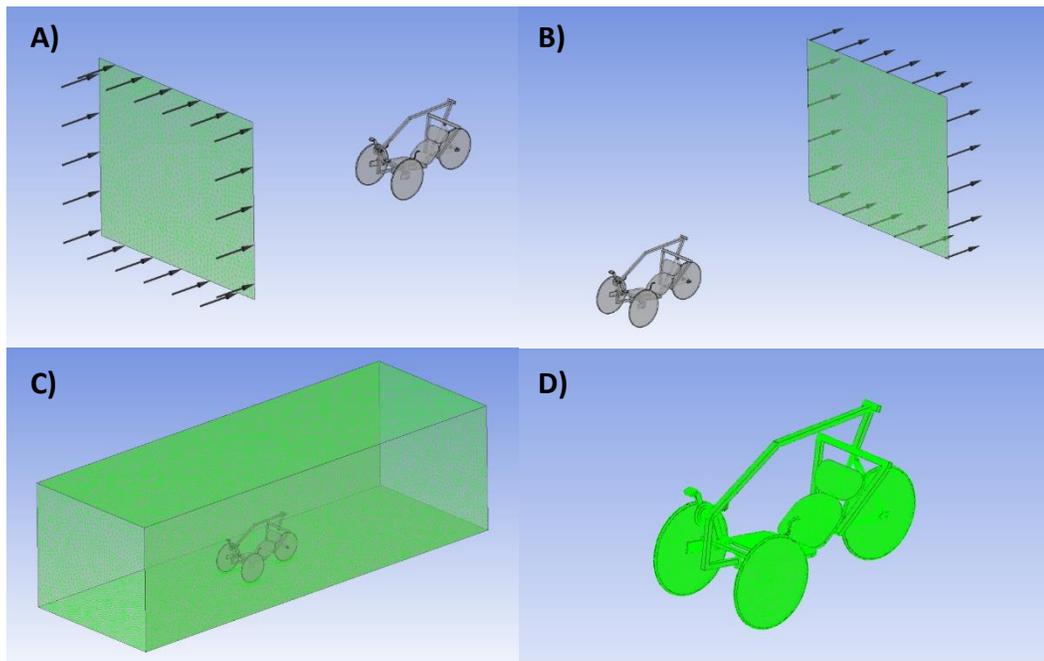


Figura 21 Condiciones de frontera VTH. A) Inlet. B) Outlet. C) Walls túnel. D) Walls VTH.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Velocidades de simulación:** Las velocidades que fueron tomadas en cuenta durante el proceso de simulación, fueron constantes y con un paso de 5 km/h, cumpliendo así la condición de ser una simulación estacionaria. Según Alam et al. (2013) la velocidad aproximada máxima que pueden alcanzar los VTH es de 35 km/h (9,7m/s), por esta razón se tomó como velocidad máxima y se empezó a bajar la misma con un paso de 5 km/h. Estas velocidades fueron aplicadas para cada una las posiciones del VTH que más adelante serán especificadas. Las velocidades fueron:

- 15 km/h (4,2 m/s)
- 20 km/h (5,5 m/s)
- 25 km/h (6,9 m/s)
- 30 Km/h (8,3 m/s)
- 35 km/h (9,7 m/s)

- 3.3.2. CFX-Post (Post-procesamiento):** Luego de corrida la simulación, finalmente es posible evidenciar los resultados de la simulación, los cuales son los encargados de mostrar el comportamiento fluido-dinámico del VTH.

Inicialmente, se debe conocer que las simulaciones fueron realizadas en 3 posiciones diferentes del VTH (derecho, giro máximo e inclinación de ruedas a 5°). Luego, se definieron los tipos de resultados que se querían sacar. En este caso fueron los siguientes:

- **Líneas de corriente:** Estas fueron obtenidas con la opción “Streamline” del CFX, la cual permite definir la cantidad de líneas dentro de las fronteras, que para este caso fue de 1000. Además, para poder analizar mejor el resultado, es necesario mirarlo desde la parte posterior, para así ver los remolinos que forma el fluido, luego de que atraviesa las paredes del VTH. En la sección de resultados se podrá ver dicho análisis.
- **Vectores de velocidad:** Estos fueron obtenidos con la opción “Vector”, la cual permite definir nuevamente la cantidad de vectores y sobre cual frontera se quiere analizar; en este caso fue sobre las zonas cercanas a las paredes del VTH (WallsVTH). Estos vectores, muestran el comportamiento del fluido al momento de chocar con las paredes del VTH, mostrando así su cambio de velocidad y de dirección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- **Contorno de velocidad:** Este fue obtenido con la opción “Contour” del CFX, pero inicialmente fue necesario agregar un plano con la opción “Plane” del CFX en el sentido ZX del VTH y por todo el medio del mismo. Esto con el fin de obtener el contorno de velocidad al plano previamente aplicado. Esto permite evidenciar la velocidad que se presenta alrededor del VTH con respecto al fluido. En la sección resultados, se podrá ver con más detalle el análisis realizado.
- **Contornos de presión:** Dichos contornos fueron obtenidos nuevamente con la opción “Contour” del CFX. La diferencia con respecto al contorno anterior, es cambiar la variable de velocidad a presión. Con esto, se quiere analizar el comportamiento que tiene el fluido sobre las paredes del VTH, evidenciando con esto, la presión que ejerce el fluido sobre el VTH a diferentes velocidades y con diferentes posiciones del mismo. En la sección de resultados, se podrá ver este contorno en diferentes perspectivas (ISO, lateral, frontal y posterior), para poder analizar detalladamente el cambio de presiones en todo el VTH.

Aparte de los anteriores resultados, en los cuales es posible analizar variables de velocidad y presión por medio de ilustraciones y espectros, también se presentan 2 resultados adicionales muy importantes para analizar el comportamiento que tiene el VTH con respecto a las fuerzas aerodinámicas más comunes en este tipo de vehículos. Estas variables de fuerza fueron inicialmente creadas en el Pre-procesamiento, creando 2 nuevas expresiones llamadas fuerza de arrastre y fuerza descendente o de sustentación inversa. Dichas expresiones fueron configuradas respecto al sentido que debían tener sobre el VTH y respecto a la variable que se deseaba medir. Ahora en el Post-procesamiento, se puede analizar dichas expresiones para cada velocidad y posición del VTH.

Estas fuerzas permiten posteriormente obtener una ecuación única que permite conocer diferentes velocidades sin necesidad de volver a simular, como es el comportamiento de dichas fuerzas. Estas fuerzas son:

- **Fuerza de arrastre:** La fuerza de arrastre fue tomada en este caso en el sentido +X. Para cada velocidad, la fuerza con la que el fluido choca el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

VTH estará dada en Newtons (N), y esta cambiará dependiendo de la velocidad del fluido y de la posición del VTH.

- **Fuerza descendente (sustentación inversa):** Esta fuerza fue medida en el sentido $-Z$, y es la encargada de mostrar la fuerza en (N) ejercida sobre el VTH a medida que el fluido choca en él. Esta también cambiará a medida que se varíe la velocidad y las posiciones del VTH.

Finalmente, es de vital importancia saber que el análisis de este VTH fue realizado en 3 posiciones diferentes y para cada posición se realizó la simulación a 5 velocidades anteriormente detalladas. En la *Figura 22(A)*, se puede observar el VTH con las ruedas derechas, la cual es la primera posición y en la que más tiempo estará el VTH. En la *Figura 22(B)*, se puede ver el VTH en su segunda posición, la cual es con el giro máximo de sus ruedas, momento en el que estará cuando haga giros. Finalmente, en la *Figura 22(C)*, se presenta el VTH con una inclinación de sus ruedas al 5° , que también será su posición normal cuando tenga que girar. Cabe recordar que la dirección del VTH es tipo “Tilting”.

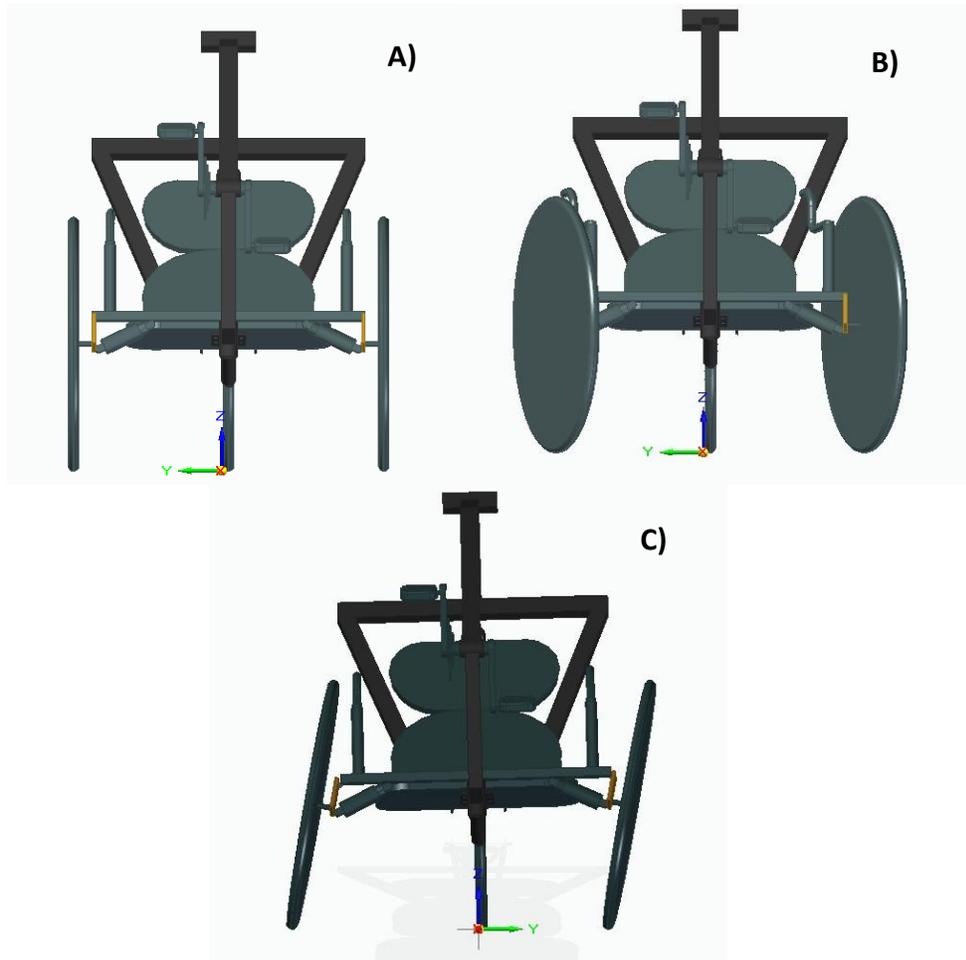


Figura 22 Posiciones VTH. A) VTH Derecho. B) VTH Giro máximo. C) VTH Inclinación de rueda 5°

Para cada uno de las posiciones y de las velocidades, se tabularon los resultados de las variables de fuerza previamente analizadas (Arrastre y descendente). En la sección de resultados se analiza con más detalle la información resultante de dicho proceso.

3.4. Coeficiente de arrastre (C_D): Para poder completar la información necesaria de la ecuación para calcular el C_D , es necesario conocer el área frontal de cada uno de las posiciones del VTH. Esta acción se realizó con la herramienta “Plano” del Solid Edge, la cual permite realizar una verificación del área frontal del VTH. En la *Figura 23(A)*, se puede observar la posición del VTH giro máximo, en la cual es donde se presenta mayor área frontal con un total de **652130,88 mm²**. En la *Figura 23(B)*, se puede ver la posición VTH Derecho, la cual tiene un área total de **443681,04 mm²**.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Y finalmente se puede ver en la *Figura 23(C)*, la posición del VTH inclinado 5°, en este caso el software no fue preciso al momento de verificar el área en algunas piezas, por tal motivo se realizó verificación de área individual pieza por pieza, para luego ser sumada con el área total que se tiene. El área total fue de 412058,94 + 48849,45 (piezas que no reconoció el software) = **460858,39 mm²**.

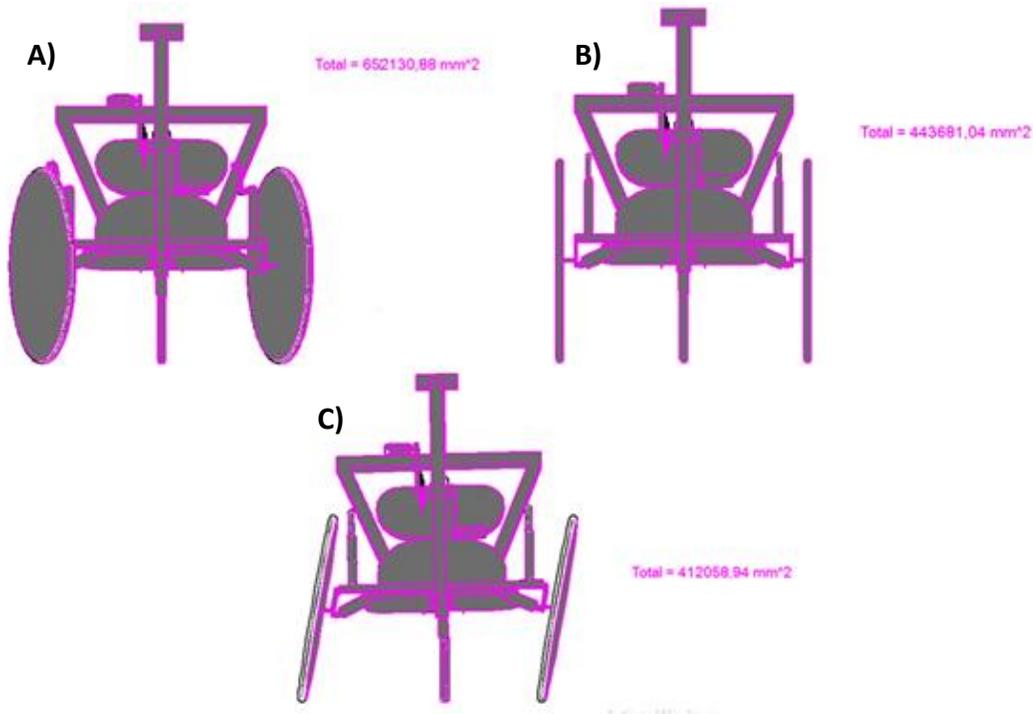


Figura 23 Área frontal VTH en mm². A) VTH Giro máximo. B) VTH Derecho. C) VTH Inclinación 5°.

Luego de tener esta información, en la sección de resultados serán resueltas todas las ecuaciones del C_D para cada velocidad y posición. Esto con el fin de comparar dichos C_D y determinar en qué posición el VTH es más eficiente aerodinámicamente. Así mismo, será posible comparar dichos resultados con los de otros vehículos comerciales.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En pro de conocer el comportamiento aerodinámico del VTH son analizadas una serie de gráficos presentados para cada posición del VTH, tanto para la velocidad máxima (35 km/h o 9,7 m/s) como para la velocidad mínima (15 km/h o 4,2 m/s), las cuales son el resultado de las simulaciones fluido-dinámicas efectuadas. Cada figura representa una variable medida en el post-procesamiento tales como los vectores de velocidad, líneas de corriente, contorno de velocidad y contorno de presión. Cada figura está dividida en 6 recuadros, 2 para cada posición del VTH, y a su vez cada uno de ellos representará la velocidad máxima y la velocidad mínima.

En el lado izquierdo de cada una de las imágenes es posible encontrar una leyenda en escala de colores la cual permite inferir las magnitudes de la velocidad o de la presión en función de la tonalidad presentada por los elementos a ser analizados. En el caso de las velocidades, se puede observar el valor máximo de 24,317 m/s asociado al color rojo de la leyenda y el valor mínimo de 0 m/s asociado al color azul oscuro de la leyenda. Para el caso de la presión, el valor máximo es de 68,840 Pa asociado al color rojo de la leyenda y el valor mínimo es de -372,961 Pa, asociado al valor azul oscuro de la leyenda. Estos valores fueron añadidos a todas las leyendas, independiente de la velocidad, con el fin de poder evidenciar gráficamente el cambio en las variables por medio de los colores que representen.

Sin embargo, en pro de realizar un análisis más detallado de cada una de las figuras a cada una de ellas se le asignó una letra, que permite identificarla en función de lo que puede observarse en el título de la Figura.

4.1. Vectores de velocidad: En la *Figura 24*, se puede observar los vectores de velocidad obtenidos para cada una de las posiciones del VTH a su velocidad máxima y mínima. Según los gráficos, se evidencia que en la velocidad mínima del VTH, los vectores de velocidad disminuyen considerablemente, razón por la cual se ven de color azul oscuro, representando valores muy bajos de velocidad. Además, es posible deducir lo siguiente:

- La posición en la que los vectores alcanzan mayores velocidades al chocar las paredes, es en el giro máximo del VTH; tanto en la *Figura 24(C)* como en la *Figura 24(D)*, se puede evidenciar la misma tendencia de los vectores, alcanzando velocidades mucho más altas que en las otras

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

posiciones, tal como la máxima presentada de 24 m/s. Esto puede ir indicando desde ya, que esta posición es la que más oposición al fluido presenta. Cabe resaltar, que debido a la simplificación de las ruedas en la cual fueron omitidos los radios de las mismas y fueron puestas compactas, el área frontal en esta posición aumenta en comparación a las otras dos posiciones, generando así, dicho comportamiento en los vectores.

- Las posiciones VTH derecha y VTH inclinación 5°, presentan similitudes en la posición y dirección de los vectores, ya que tienen una geometría parecida. En la *Figura 24(A)* y (B) se puede evidenciar una velocidad promedio máxima de 9,4 m/s y mínima de 4 m/s. En la *Figura 24(E)* y (F), se presentan variaciones muy pequeñas respecto a la posición anterior, siendo la velocidad máxima promedio de 9,7 m/s y la mínima de 4,1 m/s.

Velocidad mínima

Velocidad máxima

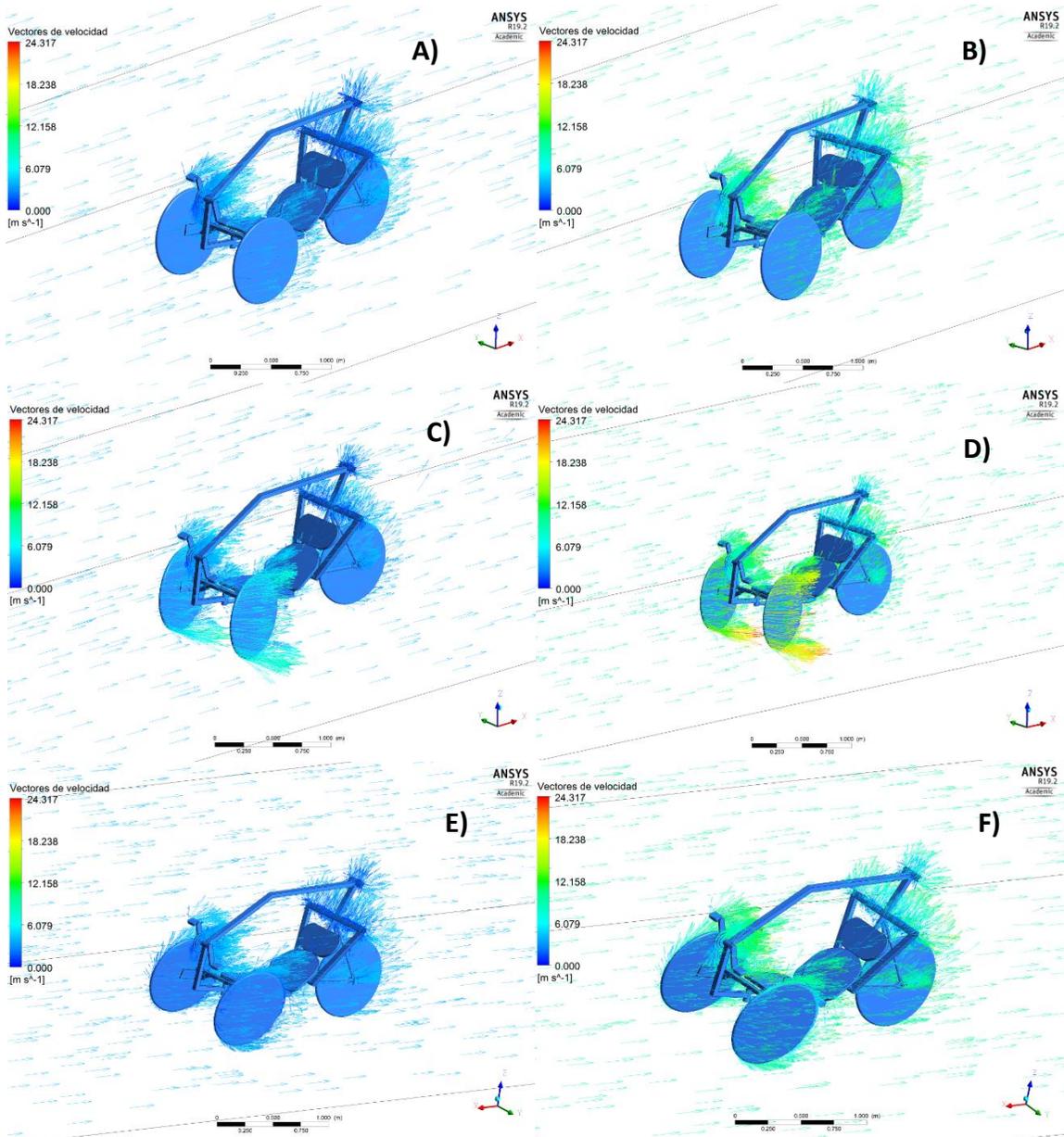


Figura 24 Vectores de velocidad. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2. Líneas de corriente: En la *Figura 25* es posible evidenciar las líneas de corriente para cada una de las posiciones del VTH a su velocidad máxima y mínima. Nuevamente, es posible evidenciar que en la velocidad mínima del VTH, se ven las líneas de corriente de color azul oscuro, obedeciendo a las bajas velocidades presentadas. Según lo visto, se puede decir lo siguiente:

- En las 3 posiciones y en todas las velocidades se generan remolinos en la parte posterior del vehículo, esto se debe a que luego que el fluido choca con las áreas frontales del VTH, se generan cambios en la dirección de las líneas de corriente que luego se convierten en estos remolinos, que dependiendo de la posición del VTH serán simétricos o asimétricos.
- Nuevamente, como se puede observar en la *Figura 25(C)* y (D) la posición VTH en su giro máximo, es la que más cambios presenta con respecto a las otras posiciones, ya que en este caso los remolinos se presentan asimétricos, teniendo mayor cantidad de líneas de corriente en el lado hacia donde el VTH se encuentra girando. Esto se puede traducir en la pérdida de estabilidad y de eficiencia al momento en que el VTH está girando. Esto también hace que las velocidades de las líneas de corriente disminuyan, teniendo un promedio en velocidad máxima de **7 m/s** aproximadamente y en velocidad mínima de **3 m/s**.
- La posición VTH Derecho tal y como se muestra en la *Figura 25(A)* y (B) presenta remolinos simétricos, los cuales hacen referencia a que es la posición en la que hay más eficiencia aerodinámica. Con una velocidad máxima promedio de **9,8 m/s** y mínima de **4,1 m/s**.
- La posición VTH Inclinación 5°, muestra una pequeña falta de simetría en sus remolinos, como se puede observar en la *Figura 25(E)* y (F), esto por cuenta de su inclinación de 5°, razón por la cual se deduce que puede haber un poco de inestabilidad al momento de estar el VTH en esa posición. Posee una velocidad máxima promedio de **9,5 m/s** y una mínima de **3,5 m/s**.

Velocidad mínima

Velocidad máxima

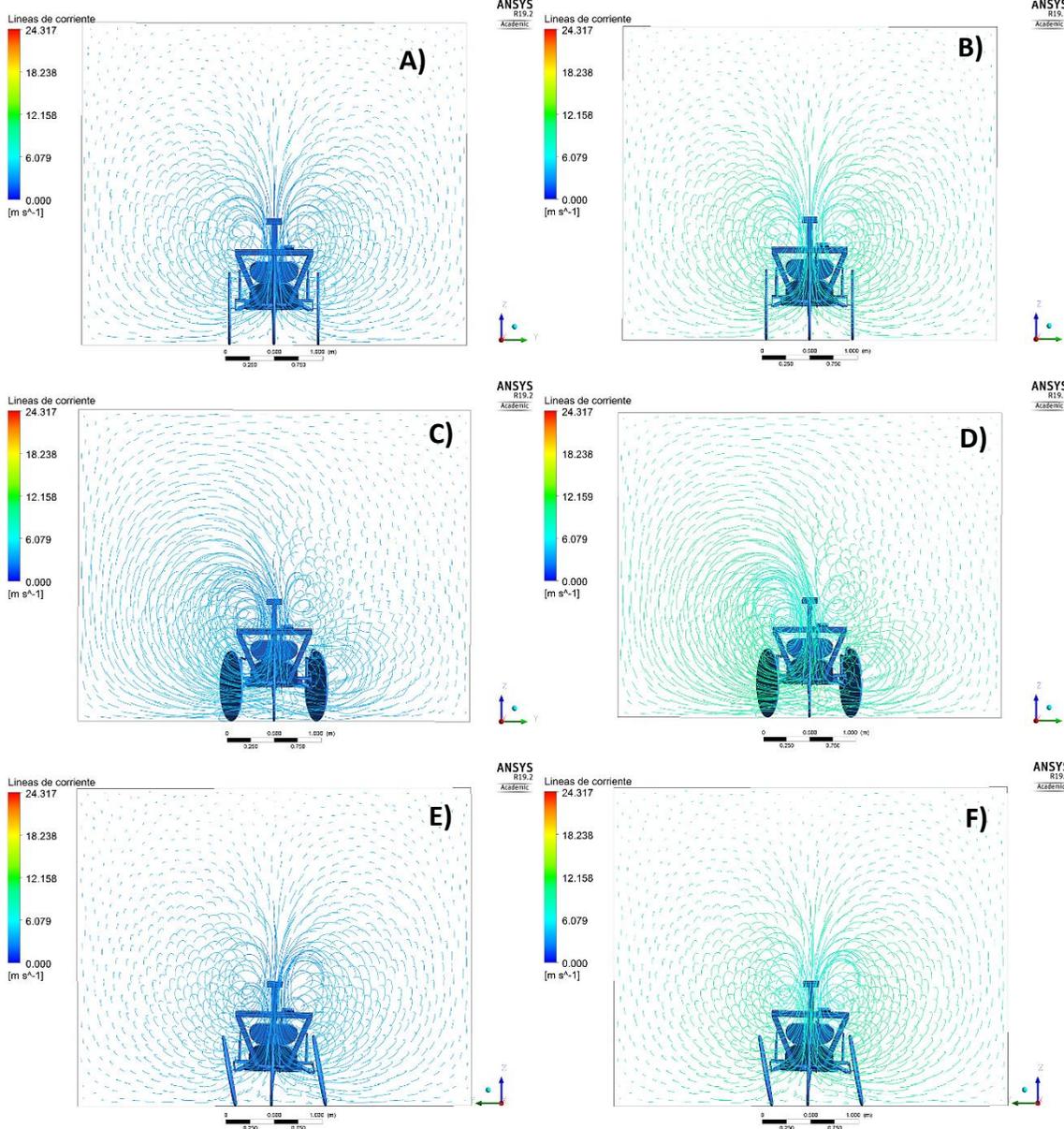


Figura 25 Líneas de corriente. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3. Contorno de velocidad: En esta ocasión, serán analizados los contornos de velocidad para cada posición y velocidad del VTH. Ya que todos tienen el mismo rango en su leyenda, las figuras muestran resultados parecidos, pero con algunos cambios en lugares críticos aerodinámicamente. De esta variable se puede analizar que:

- En la parte posterior de todas las posiciones del VTH, se observa una estela de aire con velocidades menores debidas al vacío generado por la separación del fluido al interactuar primordialmente con el asiento del mismo, el cual es el elemento que posee la mayor área frontal. Adicionalmente, se observa que en la región que se encuentra justo por debajo del chasis del vehículo, el fluido presenta un aumento en la velocidad, lo que a su vez genera una presión de vacío en dicha zona, permitiendo de esta forma generar un efecto suelo, como el empleado en la Fórmula 1 en la década de los 70's según Arango (2014). Sin embargo, dicho efecto puede deberse en gran medida a la simplificación empleada en la parte de las ruedas (sin radios), por la complejidad que representaba el uso de los radios para el proceso de discretización y la capacidad computacional con la que se contaba [Procesador de 4 núcleos de 2,66 GHz, 12 GB de RAM y 2 GB dedicadas de video]. Puesto que dicho efecto era generado por medio de unos faldones en los laterales del vehículo de F1, que mantenían el aire debajo del vehículo sin que se escapase por los costados. Por esta razón se consideran más relevantes los resultados obtenidos para la fuerza de arrastre que para la fuerza descendente en el presente estudio.
- En la posición VTH con su giro máximo tal y como se muestra en la *Figura 26(C)* y *(D)*, nuevamente se puede observar que las velocidades aumentan, por cuenta de la mayor área frontal que se presenta en esta posición, en la cual las velocidades máximas promedio son de **12,15 m/s** y las mínimas de **5 m/s**.
- En las otras posiciones del VTH se maneja el mismo rango de velocidad entre 0 y 24 m/s, siendo la velocidad máxima promedio de **11 m/s** y la mínima de **4,8 m/s**.

Velocidad mínima

Velocidad máxima

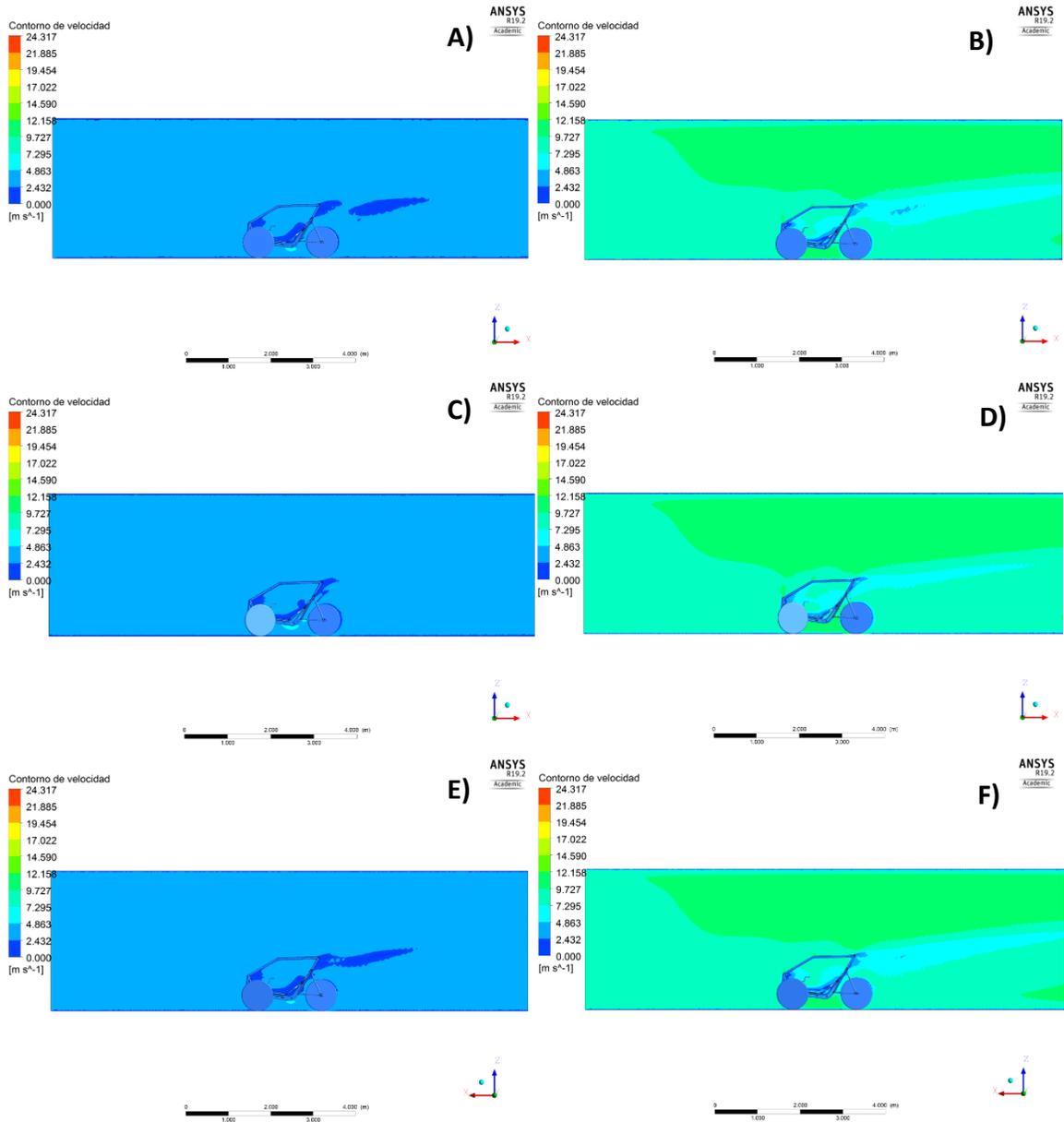


Figura 26 Contorno de velocidad. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.4 Contorno de presión: Ahora, es momento de analizar los contornos de presión para cada velocidad y posición del VTH. En esta ocasión, en la leyenda se pueden ver valores negativos, los cuales tienen una explicación lógica, ya que hay lugares donde la presión es negativa, tales como detrás del asiento, en donde el fluido no alcanza a recorrer y por ende se genera un vacío, lo cual es una presión negativa. Estos vacíos son los encargados de generar los remolinos en las líneas de corriente presentados anteriormente.

- En la *Figura 27*, podremos analizar los cambios que se presentan entre cada velocidad y posición del VTH. De entrada, se puede observar que nuevamente la posición del VTH con el giro máximo representa la mayor presión recibida por parte del fluido, en este caso una presión máxima de 68 Pa, así mismo, también es la posición en donde se alcanzan los valores más bajos (negativos), en lugares como, por ejemplo, detrás del asiento donde se alcanza a apreciar presiones negativas del valor de -66 Pa. Así mismo, en la parte frontal de las ruedas, se alcanzan a ver valores de -284 Pa, lo que indica que en esta posición el VTH posee muchas zonas donde se generan vacíos mientras el VTH gira.
- En las otras posiciones del VTH se presentan casi los mismos rangos de presión, que van desde la máxima presión de 68,840 Pa hasta la mínima de -372,961 Pa. También es posible apreciar que el lugar donde más presión se ejerce es en el asiento, ya que es el que tiene el área frontal más grande. En ambas posiciones se puede ver claramente la diferencia de presiones entre la velocidad mínima y la máxima del VTH, siendo la presión en la velocidad mínima de **2 Pa** aproximadamente y la presión en la velocidad máxima del orden de los **30 Pa** aproximadamente.

Velocidad mínima

Velocidad máxima

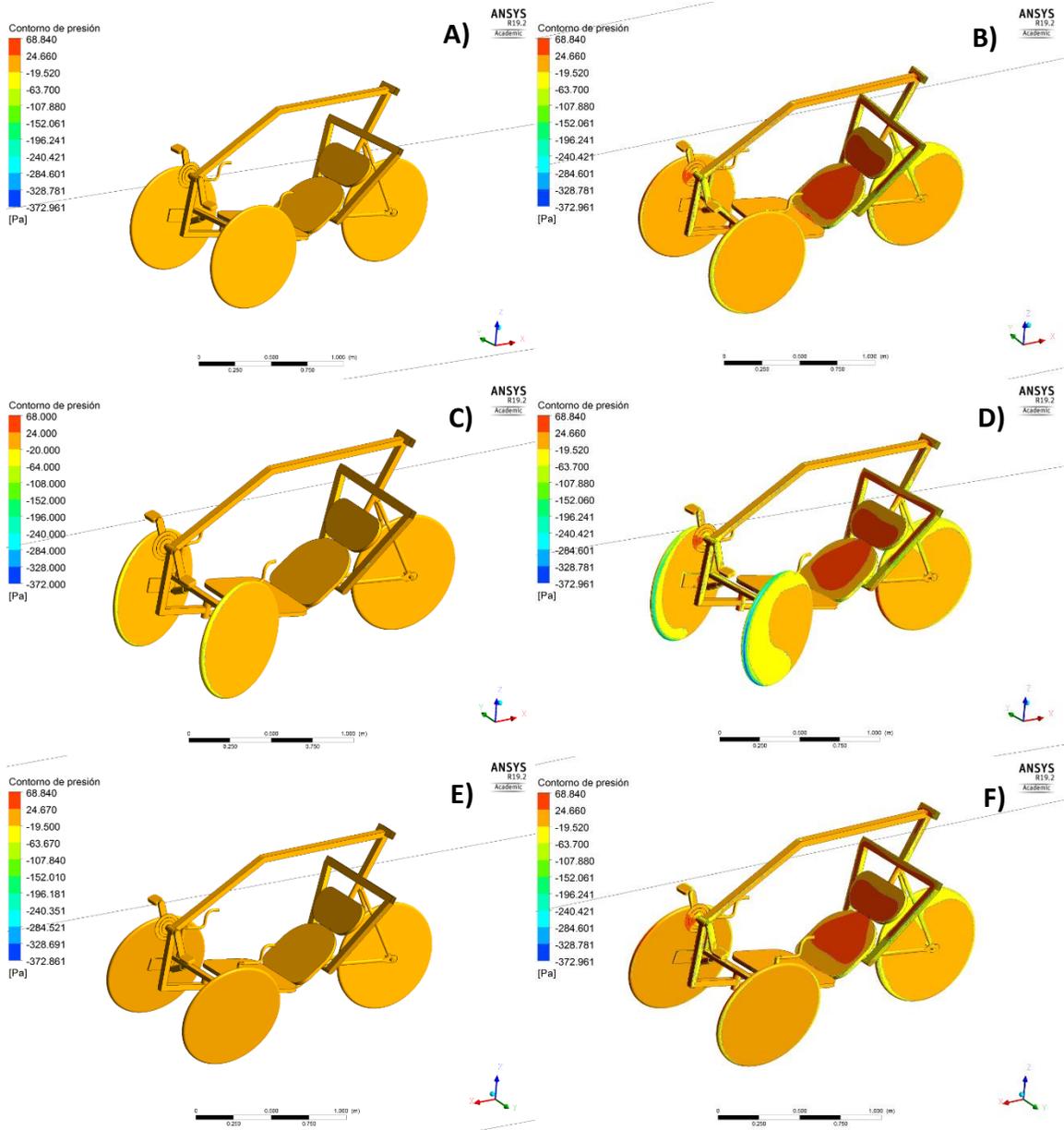


Figura 27 Contorno de presión. A) VTH Derecho velocidad mín. B) VTH Derecho velocidad máx. C) VTH Giro velocidad mín. D) VTH Giro velocidad máx. E) VTH Inclinación 5° velocidad mín. F) VTH Inclinación 5° velocidad máx.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Luego de analizar las figuras anteriores, se quiere mostrar también la diferencia que hay entre las presiones recibidas por la parte frontal del VTH, y las presiones negativas que se presentan en la parte posterior del VTH. En la *Figura 28*, se puede ver que en el área frontal del VTH se reciben presiones de **68 Pa** en promedio, mientras que en la parte posterior se pueden ver presiones que bajan hasta los **-157 Pa** las cuales generan un vacío, que a su vez es el que genera los cambios en las líneas de corriente, que se pueden traducir al momento de conducir, en pérdida de estabilidad y de eficiencia aerodinámica.

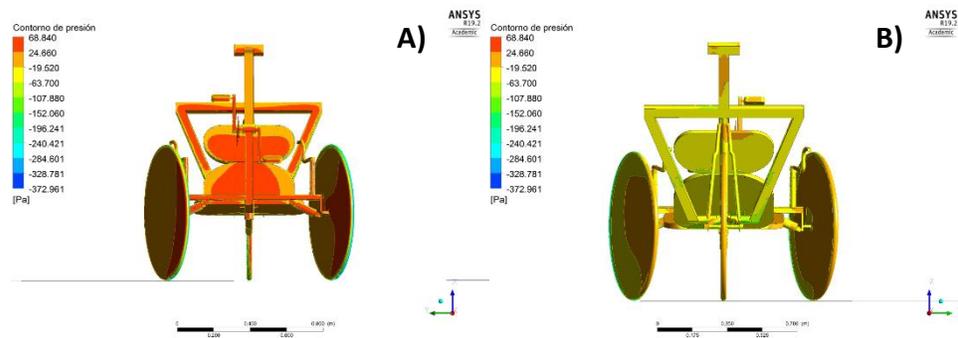


Figura 28 Contorno de presión VTH Giro máximo. A) Vista frontal. B) Vista posterior.

4.5 Fuerza de arrastre y descendente (sustentación inversa): Luego de analizadas todas las variables que se obtuvieron en el post-procesamiento, es necesario también analizar las variables de fuerza (arrastre y descendente) que cada velocidad y posición del VTH obtuvo, esto con el fin de poder ilustrar el comportamiento que obtuvieron y poder luego generar una ecuación que permita definir alguna de las variables de fuerza a cualquier velocidad sin necesidad de volver a simular. A continuación, en la *Tabla 2*, se pueden apreciar los resultados correspondientes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 2 Fuerzas de arrastre y descendente VTH para cada velocidad y posición.

Vel.	VTH Derecho		VTH Giro máximo		VTH 5° Inclinación	
	F Arrastre (Derecho)	F. Descendente (Derecho)	F Arrastre (Giro)	F. Descendente (Giro)	F Arrastre (Inclinación)	F. Descendente (Inclinación)
15	5,1723	3,0942	6,6254	3,4311	4,9417	2,69046
20	8,8351	5,3272	11,3108	5,9475	8,4591	4,6691
25	13,8675	8,406	17,8266	9,4572	13,3131	7,4238
30	20,0279	12,1808	25,6295	13,6993	19,2328	10,778
35	27,3244	16,7273	34,9371	18,7526	26,2447	14,7578

Unidades de fuerza: Newtons (N)

Unidades de la velocidad: km/h

4.5.1 Fuerza de arrastre: En la *Figura 29* podemos analizar el comportamiento que tuvo la fuerza de arrastre con respecto a las velocidades y la posición del VTH. Se puede evidenciar que tal y como se dijo en los anteriores resultados, la posición VTH con giro máximo es la que presenta la mayor oposición al fluido y, por ende, en este caso obtiene la mayor fuerza de arrastre con respecto a las otras posiciones. Cabe resaltar que el VTH únicamente estará en esta posición cuando va realizar giros, minimizando así la pérdida de eficiencia durante el recorrido. Además, es posible analizar también que la fuerza de arrastre en las otras dos posiciones fue muy similar, con una pequeña diferencia sin relevancia que fue aumentando desde la velocidad de 20 km/h. En esta figura, es posible observar cómo fueron implementadas las ecuaciones para cada posición del VTH, con la cual ahora será posible obtener la fuerza de arrastre para cualquier velocidad y esto con una efectividad del 100%, ya que el valor de R^2 obtenido fue igual a 1.

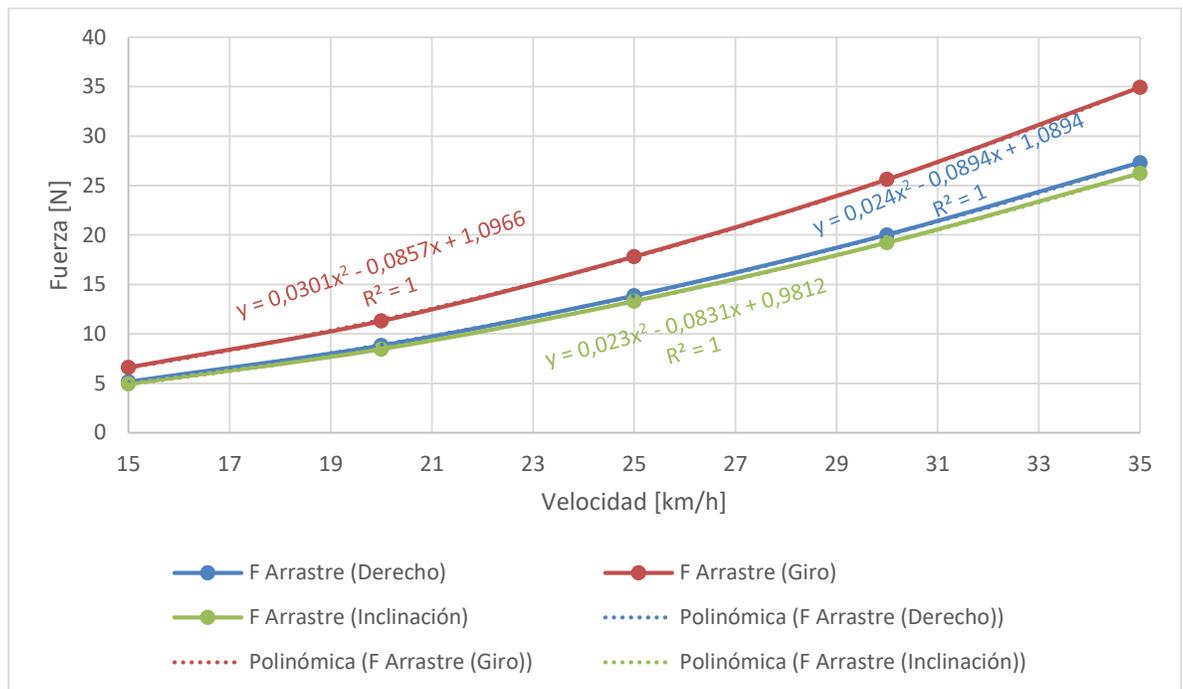


Figura 29 Fuerza de arrastre vs Velocidad del VTH

4.5.2 Fuerza descendente (sustentación inversa): En esta ocasión, se analizará el resultado obtenido por medio del comportamiento obtenido por las fuerzas descendentes (sustentación inversa) con respecto a la velocidad y posición del VTH. Nuevamente en este caso, se puede observar que la posición que más expuesta está a esta fuerza, es cuando el VTH está en giro máximo. Con esto queda en claro que, que esta posición es la menos eficiente aerodinámicamente por su alta oposición al fluido con respecto a las otras posiciones. A diferencia de la fuerza de arrastre en este caso tenemos una diferencia más amplia entre las otras 2 posiciones del VTH, ya que, en este caso el VTH derecho posee más fuerza descendente que el VTH inclinado. Cabe resaltar que, según el análisis realizado en el contorno de velocidad, se optó por darle prevalencia a la fuerza de arrastre, esto por motivo de que se acerca más a la realidad, luego de haber realizado las simplificaciones geometrías del modelo.

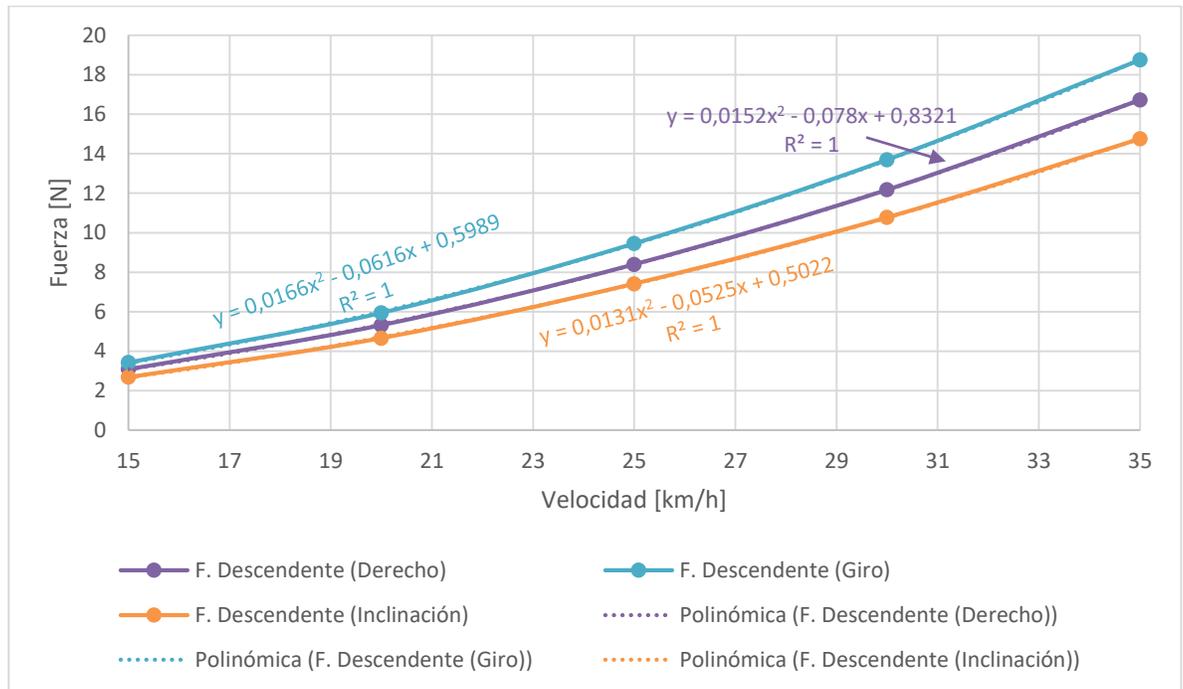


Figura 30 Fuerza descendente vs Velocidad VTH.

4.6 Coeficiente de arrastre (C_D): Es momento ahora de realizar el cálculo de los diferentes coeficientes de arrastre para cada velocidad y posición del VTH. Se le realizará el procedimiento a uno de ellos únicamente para dejar evidenciado el paso a paso y para los otros simplemente se mostrará el resultado tabulado.

- Para el VTH derecho en su velocidad mínima, tenemos los siguientes datos necesarios para dicho proceso:

F_D : 5,1723 N
 ρ : 1,205 kg/m³
 v : 4,2 m/s
 A : 0,44 m²

$$C_D = \frac{2(5,1723 \frac{kg \cdot m}{s^2})}{(1,205 \frac{kg}{m^3})(4,2 \frac{m}{s})^2 (0,44 m^2)} = 1,09$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 3 Coeficiente de arrastre C_D

Velocidad m/s	VTH Derecho			VTH Giro máximo		
	Coef. Arrastre	Área (m)	F Arrastre (Derecho)	Coef. Arrastre	Área (m)	F Arrastre (Giro)
4,2	1,097075552	0,4436	5,1723	0,9559	0,6521	6,6254
5,5	1,092791987	0,4436	8,8351	0,9517	0,6521	11,3108
6,9	1,089811545	0,4436	13,8675	0,9530	0,6521	17,8266
8,3	1,087753879	0,4436	20,0279	0,9469	0,6521	25,6295
9,7	1,086572169	0,4436	27,3244	0,9450	0,6521	34,9371
Promedio	1,090801026			0,9505		

Velocidad m/s	VTH 5° Inclinación		
	Coef. Arrastre	Área (m)	F Arrastre (Inclinación)
4,2	1,009039748	0,4608	4,9417
5,5	1,007231405	0,4608	8,4591
6,9	1,007190199	0,4608	13,3131
8,3	1,005580421	0,4608	19,2328
9,7	1,004682003	0,4608	26,2447
Promedio	1,006744755		

Como se pudo observar, durante el proceso se encontró la curiosidad de que, para todas las velocidades, el coeficiente de arrastre era casi el mismo. Por esto, se decidió realizar un promedio para cada posición del VTH. Los cuales son:

- **VTH Derecho:** 1,09 C_D
- **VTH Inclinación 5°:** 0,95 C_D
- **VTH Giro máximo:** 1,01 C_D

De acuerdo a los anteriores resultados, es posible analizar que el C_D promedio para todas las posiciones del VTH es del orden de 1, lo cual nos permite inferir que el VTH motivo de este estudio no tiene la mejor eficiencia aerodinámica a comparación de otros vehículos. A continuación, en la *Tabla 4*, se compara el coeficiente de arrastre resultante del VTH en su posición derecha, con otros vehículos automotores comerciales.

Tabla 4 Comparación de coeficientes de arrastre

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 5 Comparación de coeficientes de arrastre

Vehículo	Coefficiente de arrastre	% de diferencia
Renault Sandero	0,35	67,88990826
Mazda 3	0,26	76,14678899
Alfa Romeo Giulia	0,32	70,64220183
VTH	1,09	71,55963303

(Renault, 2017), (Mazda, 2018) y (Romeo, 2017).

Los anteriores resultados, permiten concluir que el VTH analizado es aproximadamente un 71% menos eficiente que un automóvil comercial.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Se le realizó satisfactoriamente el análisis fluido-dinámico al VTH que participó en la competencia local de vehículos de tracción humana Antioquia 2018, en el programa ANSYS y utilizando diferentes herramientas tales como Design Modeler, Meshing y CFX. De esta manera se pudo obtener, las presiones y fuerzas (arrastre y sustentación inversa) a las cuales se ve sujeto el vehículo en función de la velocidad, permitiendo incluso obtener las funciones que describen sus comportamientos para cada una de las posiciones estudiadas.
- La consulta en la literatura permitió definir las características del túnel de viento empleado y el rango de velocidades a ser analizadas. Esta consulta fue fundamental en la selección del modelo de turbulencia k-omega SST, puesto que este permite analizar vorticidades sin incrementar en gran medida el recurso computacional requerido.
- Se generó correctamente el modelo CAD del VTH, utilizando el software de modelado Solid Edge ST9; así mismo, se generaron los volúmenes de fluidos correspondientes a cada una de las posiciones de análisis, en concordancia, con las medidas del túnel de viento previamente definidas (9mX3mX2m) largo, ancho y alto respectivamente, lo anterior en el módulo Design Modeler del ANSYS.
- El estudio de independencia de malla realizado permitió obtener resultados con porcentajes de error inferiores al 1,5%, lo cual va más allá de lo inicialmente planteado, puesto que el valor objetivo era del 5% a pesar de obtener valores muy cercanos al límite permisible para la métrica de oblicuidad.
- Se encontró que aerodinámicamente, el giro por medio de la inclinación del VTH resulta más eficiente que el giro de las ruedas; sin embargo, esto puede deberse en gran medida a las simplificaciones geométricas empleadas, primordialmente en el área de las ruedas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Por la misma simplificación efectuada en la zona de las ruedas, se asumen más relevantes los resultados obtenidos para el caso de las fuerzas de arrastre que el de las fuerzas de sustentación inversa o descendentes.
- El presente estudio permite inferir las cargas aerodinámicas a las cuales se verá expuesto el VTH, a velocidades diferentes a las evaluadas por medio de las funciones presentadas en las figuras 29 y 30.
- El análisis del coeficiente de arrastre del VTH, permite comprobar la eficiencia del mismo, y siendo comparado con otra clase de vehículos, en este caso automóviles comerciales, se encontró que el VTH es un 71% menos eficiente. Además, se pudo demostrar, que la velocidad no influye en el resultado de dicho coeficiente.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar métodos de mallado estructurado, que permitan la implementación de los radios en las ruedas del VTH, en pro de conocer cuan influyente es la omisión de los mismos en los resultados obtenidos.

5.3 Trabajo futuro

- Luego de los resultados obtenidos, es posible realizar un proyecto en el cual se busque agregar componentes a la estructura del VTH, con el fin de mejorar la eficiencia aerodinámica, tales como cubiertas, alerones, deflectores, entre otros.
- Siguiendo los resultados obtenidos, es posible recrear todo el proceso de simulación de modo experimental, materializando a pequeña escala, el VTH y el túnel de viento, con la finalidad de comparar los resultados que se obtienen teóricamente y experimentalmente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Alam, F., Chowdury, H., Guillaume, E., Yang, J., & Zimmer, G. (2013). On-road and wind tunnel aerodynamic study of human.pdf. *Procedia Engineering*, 60, 473–478.
- Alam, F., Silva, P., & Zimmer, G. (2012). Aerodynamic study of Human Powered Vehicles. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.003>
- Antonio, W., & Lozano, O. (2006). Diseño y simulación de las fuerzas de arrastre y sustentación en los autos, 4(2), 26–33.
- Arango, A. M. (2014). *Análisis del efecto suelo en el alerón delantero de un vehículo tipo formula*.
- Camúñez Llanos, R. (2014). Elementos y dispositivos aerodinámicos en la Fórmula 1: parte central del vehículo, 13. Retrieved from [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24755/TFG memoria.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24755/TFG%20memoria.pdf)
- Cfx, A. (2016a). Lecture 03 : Overview of the CFD Process and CFX Workflow.
- Cfx, A. (2016b). Lecture 09 : Turbulence.
- Jimenez, G., Paroush, Z. 'E., & Ish-Horowicz, D. (1997). *Aerodynamic drag coefficients of a variety of electrical conductors*. *Genes & Development*.
- Kyle, C. R., & Weaver, M. D. (2004). Aerodynamics of human-powered vehicles, 218, 141–154. <https://doi.org/10.1243/095765004323049878>
- Mazda. (2018). Especificaciones técnicas Mazda3.
- Meshing, A. (2016a). Module 02 : Meshing Methods, 1–38.
- Meshing, A. (2016b). Module 03 : Global Mesh Controls, 1–24.
- Meshing, A. (2016c). Module 05 : Mesh Quality & Advanced Topics.
- Patiño Molina, F. J. (2011). Diseño y construcción de vehiculo de tracción humana para la competencia Uniandes, 53, 13. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Renault. (2017). Ficha tecnica Renault Sandero.
- Rojas Camargo, C. A. (2015). *Dirección "titling" (por inclinación) trasera para vehiculos de traccion humana VTH*.
- Romeo, A. (2017). Ficha tecnica Alfa Romeo Giulia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



FIRMA ESTUDIANTES _____

Sebastian Velaz G.
 primera entrega
 informe final
 19/10/2018

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: _____ 19/10/2018 _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO___ ACEPTADO___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____