

PÁGINA 1 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



"DISEÑO AERODINAMICO DE LA CARROCERIA DE UN VEHICULO PARA LA PARTICIPACION EN LA COMPETENCIA DE EFICIENCIA ENERGETICA SHELL ECO MARATHON EN LA CATEGORIA PROTOTIPO"

AUTOR

CARLOS YESID GAMBOA GUERERRO

CC. 1095940064

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
BUCARAMANGA
FECHA DE PRESENTACIÓN: 15-01-2020



PÁGINA 2 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



"DISEÑO AERODINAMICO DE LA CARROCERIA DE UN VEHICULO PARA LA PARTICIPACION EN LA COMPETENCIA DE EFICIENCIA ENERGETICA SHELL ECO MARATHON EN LA CATEGORIA PROTOTIPO"

AUTOR

CARLOS YESID GAMBOA GUERERRO

CC. 1095940064

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero electromecánico

DIRECTOR

M.Sc. Eng. DIANA CAROLINA DULCEY DIAZ

Grupo de Investigación en Diseño y Materiales-DIMAT Semillero de investigación en ingeniería y automotriz-SIIMA

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA
BUCARAMANGA
FECHA DE PRESENTACIÓN: 15-01-2020



PÁGINA 3 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Nota de Aceptacio
Firma del jurad
Firma del Jurad



PÁGINA 4 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

DEDICATORIA

A Doris, Juliana, Silvia y las otras extraordinarias personas que estuvieron conmigo en el camino hasta aquí.



PÁGINA 5 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

AGRADECIMIENTOS

Es la gente que lo quiere a uno y que uno quiere la principal fortaleza en los momentos difíciles de la vida, son sus consejos los que retumban en la cabeza cuando se toman decisiones importantes, también es a esas personas a las que uno agradece en momentos buenos de la vida, este es uno de esos.

Extiendo mi gratitud a la empresa en la que laburé durante el periodo de la carrera profesional, al semillero de investigación SIIMA y su grandiosa docente líder.

Tabla de contenido



PÁGINA 6 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

<u>RESU</u>	MEN EJECUTIVO	<u>. 2</u>
INTRO	DDUCCIÓN	. 2
<u>1.</u>	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2.	JUSTIFICACIÓN	
1.3.	OBJETIVOS	
1.3.1.	OBJETIVO GENERAL	
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
1.4.	ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES	
1.4.1.	ANALISIS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA PARA EL	
PROT	OTIPO DE COMPETENCIA POR PARTE DE LA UNIVERSIDAD DE AZUAY	
1.4.2.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA DE UN PROTOTIPO PAR	Α
LA CC	MPETICIÓN SHELL ECO-MARATHON	.2
1.4.3.	PROPUESTA METODOLÓGICA EN EL ÁMBITO DE LA MECATRÓNICA:	
	CULOS DE COMPETICIÓN DE ALTA EFICIENCIA	.2
1.4.4.	ESTUDIO Y DISEÑO DEL CARROZADO DE UN PROTOTIPO PARA	
	PETIR EN SHELL ECO-MARATHON	.2
	EȘTUDIO DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA APLICADOS A LA	
	DINÁMICA EXTERNA DE UN AUTOMÓVIL, MEDIANTE SOFTWARE DE	_
DINAN	IICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS	.2
2 .	MARCOS REFERENCIALES	. 2
2.1.	DINAMICA DE FLUIDOS	
2.1.1.	FLUIDOS COMPRESIBLES EN COMPARACIÓN CON LOS INCOMPRESIBLE 2	
2.1.2.	PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	
2.1.3.	NÚMERO DE REYNOLDS	.2
2.1.4.	REGIMÉN LAMINAR	
2.1.5.	FLUJOS ESTACIONARIOS Y NO ESTACIONARIOS	
2.1.6.	DESCRIPCIÓN DEL FLUJO	
2.1.7.	CAPA LÍMITE	. 2
	AERODINAMICA DE LOS VEHICULOS	.2
2.1.9	FUERZAS AERODINAMICAS PRESENTES EN EL MOVIMIENTO DE UN	
VEHIC	CULO	
	2.1.9.1 FUERZA DE ARRASTRE	
	2.1.9.2 COEFICIENTE DE ARRASTRE AERODINÁMICO	.2
	2 1 9 3 ARRASTRE DEBIDO A FRICCIÓN Y PRESION	2



PÁGINA 7 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

	2.1.9.4 RE	SISTENCIA DEBIDO A FRICCION	2
	2.1.9.5 RE	SISTENCIA DEBIDO A LA PRESIÓN	2
2.1.10		ONES PRESENTES EN EL MOVIMIENTO DE UN FLUIDO CUACIÓN DE BERNOULLI	
	2.1.10.2 E	CUACION DE CONTINUIDAD	2
2.1.11	REGIMEN 2.1.11.1 M	I TURBULENTOIODELADO DE LA TURBULENCIA	2
2.2.7. 2.2.2 2.2.2 2.2.3 (DISE	MALLAI MALLAI MODEL	A DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	2 2 2
	2.2.3.3	COMPLEMENTO SOLIDWORKS FLOW SIMULATION	2
2.3. 2.3.1. 2.3.2.	FACTO	DRES DE DISEÑOR DE SEGURIDAD ON DE VON MISES	2
<u>3.</u>	DESARRO	DLLO DEL TRABAJO DE GRADO	2
3.3.	MODELAI	DLLO DEL TRABAJO DE GRADO	2
3.3.	MODELAI REQUE	DO Y ENSAMBLAJE	2
3.3. 3.1.1.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2	DO Y ENSAMBLAJERIMIENTOS PREVIOSINSTALACIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE SOLID WORKS ®	2 2 2
3.3. 3.1.1.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC	DO Y ENSAMBLAJERIMIENTOS PREVIOSINSTALACIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE SOLID WORKS ® ENSAMBLAJE DE CHASISCIONES GENERALES DE DISEÑO	2
3.3. 3.1.1. 3.1.2.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC 3.1.2.1 3.1.2.2	DO Y ENSAMBLAJERIMIENTOS PREVIOSINSTALACIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE SOLID WORKS ® ENSAMBLAJE DE CHASIS	2
3.3. 3.1.1. 3.1.2.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC 3.1.2.1 3.1.2.2 PROPU 3.1.3.1	DO Y ENSAMBLAJERIMIENTOS PREVIOSINSTALACIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE SOLID WORKS ® ENSAMBLAJE DE CHASIS	2 2 2 2 2
3.3. 3.1.1. 3.1.2.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC 3.1.2.1 3.1.2.2 PROPU 3.1.3.1 • MODI	DO Y ENSAMBLAJE	2 2 2 2 2 2
3.3. 3.1.1. 3.1.2.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC 3.1.2.1 3.1.2.2 PROPU 3.1.3.1 • MODI • ENSA 3.1.3.2	DO Y ENSAMBLAJE	2 2 2 2 2 2 2
3.3. 3.1.1. 3.1.2.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC 3.1.2.1 3.1.2.2 PROPU 3.1.3.1 • MODI • ENSA 3.1.3.2	DO Y ENSAMBLAJE RIMIENTOS PREVIOS INSTALACIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE SOLID WORKS ® ENSAMBLAJE DE CHASIS CIONES GENERALES DE DISEÑO REGLAS DE LA COMPETENCIA SHELL ECO MARATHON DIMENSIONES EN CATEGORÍA PROTOTIPO ESTAS PROPUESTA 1 ELADO MBLAJE PROPUESTA 2 ELADO	2 2 2 2 2 2 2
3.3. 3.1.1. 3.1.2.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC 3.1.2.1 3.1.2.2 PROPU 3.1.3.1 • MODI • ENSA 3.1.3.2	DO Y ENSAMBLAJE	2 2 2 2 2 2 2
3.3. 3.1.1. 3.1.2.	MODELAI REQUE 3.1.1.1 3.1.1.2 CONDIC 3.1.2.1 3.1.2.2 PROPU 3.1.3.1 • MODI • ENSA 3.1.3.2	POO Y ENSAMBLAJE	2 2 2 2 2 2 2



PÁGINA 8 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

ENSAMBLAJE	2
3.2 ANALISIS ESTATICO	
3.2.1 MATERIAL	
3.2.2.1 PREPROCESO	
MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO	2
EDICIÓN/APLICACIÓN DEL MATERIAL	
DEFINICIÓN DEL GROSOR	
SUJECIONES	2
CARGA DE OPERACIÓN	
CARGA DE DISEÑO	
• MALLADO	
3.2.2.2 PROCESO	2
• SOLVER	2
3.2.3 PROPUESTA 2	2
3.2.3.1 PREPROCESO	2
MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO	
EDICIÓN/APLICACIÓN DEL MATERIAL	2
DEFINICIÓN DEL GROSOR	2
SUJECIONES	2
CARGAS DE OPERACIÓN	2
CARGA DE DISEÑO	2
• MALLADO	2
3.2.3.2 PROCESO	2
• SOLVER	2
3.2.4 PROPUESTA 3	
3.2.4.1 PREPROCESO	
MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO	
EDICIÓN/APLICACIÓN DEL MATERIAL	
DEFINICIÓN DEL GROSOR	
SUJECIONES	
CARGAS DE OPERACIÓN	2
CARGA DE DISEÑO	2



PÁGINA 9 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

• MALLADO	2
3.2.4.2 PROCESO	2
• SOLVER	2
	O AERODINAMICO2
3.3.1 PROPUESTA 1	
	PLIFICADO2
)
	N2
	2
	2
3.3.2 PROPUESTA 2	2
3.3.2.1 PREPROCESO	2
 MODELO DE SIMULACIÓN SIM 	PLIFICADO2
DOMINIO	2
• MALLADO	2
 CONDICIONES DE CONTORNO)2
 OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓ 	N2
3.3.2.2 PROCESO CFD	2
• SOLVER	2
	2
	2
	PLIFICADO2
	2
	2
)2
	N2
	2
	2
	OS TÉCNICOS2
0.7.11 LANOS ILCINICOS	



PÁGINA 10 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

<u>4.</u>	RESULTA	ADOS	. 2
4.1. 4.1.1	MODE	ADOS POR ETAPASLADO Y ENSAMBLAJEROPUESTA 1	2
	4.1.1.2 PI	ROPUESTA 2	2
		ROPUESTA 3	
		ELECCIÓN PARCIAL	
4.1.2	ANALIS 4.1.2.1	SIS ESTATICOPOSTPROCESO 1	
	• RES	ULTADOS DE TENSIONES DE VONMISES	2
	• RES	ULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD	2
	4.1.2.2	POSTPROCESO 2	. 2
	• RES	ULTADOS DE TENSIONES DE VONMISES	2
	• RES	ULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD	2
	4.1.2.3	POSTPROCESO 3	. 2
	• RES	ULTADOS DE TENSIONES DE VONMISES	2
	• RES	ULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD	2
	4.1.2.4	SELECCIÓN PARCIAL	. 2
4.1.3	SIMULA 4.1.3.1	ACION AERODINAMICAPOSTPROCESO 1	
	• COE	FICIENTE DE ARRASTRE CD	2
	• COE	FICIENTE DE SUSTENTACIÓN CL	2
	• RES	ULTADOS DE PRESIÓN	2
	• RES	ULTADOS DE VELOCIDAD	2
	• RES	ULTADOS GLOBALES	2
	4.1.3.2	POSTPROCESO 2	2
	• COE	FICIENTE DE ARRASTRE CD	2
	• COE	FICIENTE DE SUSTENTACIÓN CL	2
	• RES	ULTADOS DE PRESIÓN	2
	• RES	ULTADOS DE VELOCIDAD	2
	• RES	ULTADOS GLOBALES	2
	4.1.3.3	POSTPROCESO 3	2
	• COE	FICIENTE DE ARRASTRE CD	2



PÁGINA 11 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

	COEFICIENTE DE SUSTENTACION CL	2
	RESULTADOS DE PRESIÓN	2
	RESULTADOS DE VELOCIDAD	2
	RESULTADOS GLOBALES	
	4.1.3.4 SELECCIÓN PARCIAL	2
4.2.	SELECCIÓN DE PROPUESTA FINAL	2
4.3.	RESUMEN DEL DESARROLLO DEL TRABAJO	
4.2.1.	MODELADO	2
4.2.2.	ANALISIS ESTATICO	2
4.2.3.	ANALISIS AERODINAMICO	2
4.4 Al	RCHIVOS CAD	2
<u>5.</u>	CONCLUSIONES	2
<u>6.</u>	RECOMENDACIONES	2
<u>7.</u>	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	2
_	ANEXOS	_
<u>8.</u>	ANEXUS	<u>2</u>
8.1 PI	LANOS TECNICOS	2

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración trabajo final de la Universidad Azuay	
Figura 2. Diseño final del prototipo Universidad de Murcia	
Figura 3. Modelo final de la propuesta de tesis doctoral	



PÁGINA 12 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Figura 4. Trabajo final Universidad Carlos III	2
Figura 5. Esfuerzo cortante	2
Figura 6.Flujo laminar alrededor de obstáculos con forma diferente	2
Figura 7. Evolución de la capa límite	2
Figura 8. Coeficientes de arrastre experimentales para diferentes formas con Re>104	2
Figura 9. Fuerza tangencial por acción de la fricción	
Figura 10. Regiones válidas de la ecuación de Bernoulli	
Figura 11. Flujo turbulento	2
Figura 12. Malla estructurada	
Figura 13. Malla no estructurada	2
Figura 14. Captura de pantalla Solidworks	2
Figura 15.Captura de pantalla Solidworks Flow Simulation	2
Figura 16. Ensamblaje chasis-maniquí	2
Figura 17. Croquis de la propuesta 1 en planta	
Figura 18. Croquis de la propuesta 1 en alzado	2
Figura 19. Operación recubrir para modelo 1	
Figura 20. Operación de vaciado para modelo 1	2
Figura 21. Operación de corte para panorámico	2
Figura 22. Operación de rellenado de superficie modelo 1	2
Figura 23. Vista explosionada modelo 1	
Figura 24. Creación de croquis de modelo 2	2
Figura 25.Creación de croquis de modelo 2	
Figura 26. Operación recubrir para modelo 2	2
Figura 27. Operación de vaciado en modelo 2	2
Figura 28. Operación recubrimiento de superficie para modelo 2	2
Figura 29. Operación de corte ventana lateral para modelo 2	2
Figura 30. Operación de corte ventana frontal para modelo 2	2
Figura 31. Operación de relleno superficie hueca ventana para modelo 2	2
Figura 32.Perfil de carrocería en vista superior y frontal de propuesta 2	2
Figura 33. Croquis en vista superior para modelo 3	
Figura 34. Corte para ventana modelo 3	
Figura 35. Vista explosionada de propuesta 3	2
Figura 36. Modelo de simulación simplificado para modelo 1	2
Figura 37. Definición del grosor del modelo 1	
Figura 38. Geometría fija de la simulación modelo 1	2
Figura 39. Aplicación de gravedad como carga externa modelo 1	2
Figura 40. Aplicación de carga del viento como externa modelo 1	2
Figura 41. Estimación del valor de masa para el modelo 1	2
Figura 42.Creación de la malla modelo 1	2
Figura 43. Mallado modelo 1	2
Figura 44. Ventana de solver modelo 1	2
Figura 45.Modelo simplificado de modelo 2	
Figura 46.Edición y aplicación del material	
Figura 47 Definición del grosor en el administrador de vaciados modelo 2	



PÁGINA 13 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Figura 4	l8.Selección de la geometría fija en modelo 22
Figura 4	19. Aplicación de condición de contorno gravedad2
Figura 5	50.Aplicación de carga del viento como externa modelo 2
Figura 5	51. Masa del modelo 2
Figura 5	52. Creación de malla del modelo 22
Figura 5	53. Mallado del modelo 22
	54.Cuadro de solver modelo 22
Figura 5	55.Modelo simplificado para simulación 32
Figura 5	56.Edición y aplicación del material2
Figura 5	57.Definición del grosor en el administrador de vaciados modelo 32
Figura 5	58.Selección de la geometría fija2
Figura 5	59.Aplicación de condición de contorno gravedad2
Figura 6	60.Aplicación de carga del viento como externa modelo 3
Figura 6	61.Masa del modelo 3
Figura 6	S2.Creación de malla del modelo 32
Figura 6	63.Mallado del modelo 32
	64.Cuadro de solver modelo 32
Figura 6	65.Modelo de propuesta 1 como solido entero2
	66.Sección de un túnel de viento2
Figura 6	67.Dimensiones del túnel de viento2
Figura 6	88.Dominio computacional definido modelo 12
Figura 6	69.Mallado con las opciones por defecto del software2
	70.Mallado manual
	71.Tipo de análisis2
Figura 7	72.Tipo de análisis2
	73.Parámetros generales2
Figura 7	74.Objetivos globales2
	75.Ventana solver solidworks2
Figura 7	76. Ventana objetivos vs. Cantidad de iteraciones en tiempo real
	77. Vista previa líneas isométricas2
	78.Vista previa en contorno2
	79.Modelo de propuesta 2 como solido entero2
	30.Dominio computacional definido modelo 22
	31.Mallado modelo 2 con las opciones por defecto del software2
	32.Mallado manual modelo 2
	33. Ventana objetivo en tiempo real vs. Cantidad de iteraciones modelo 2
	34. Vista parcial en contorno de presiones2
	35.Modelo de propuesta 3 como solido entero2
	36.Dominio computacional definido modelo 32
	37.Mallado modelo 3 con las opciones por defecto del software
	38.Mallado manual modelo 3
Figura 8	39.Ventana objetivo en tiempo real modelo 32
	20. Vista parcial en contorno de presiones
	21. Principales vistas ortogonales e isométricas de las propuestas.



PÁGINA 14 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Figura 92.Perfil de carrocería en vista frontal de propuesta 1	
Figura 93. Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 1	2
Figura 94.Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 1	2
Figura 95. Vista isométrica carrocería de propuesta 1	
Figura 96.Perfil de carrocería en vista frontal de propuesta 2	
Figura 97.Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 2	
Figura 98.Perfil de carrocería en vista lateral de propuesta 2	
Figura 99. Modelo final de propuesta 2	
Figura 100.Perfil de carrocería en vista frontal de propuesta 3	
Figura 101.Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 3	
Figura 102.Perfil de carrocería en vista lateral de propuesta 3	
Figura 103.Modelo final de propuesta 3	
Figura 104. Tensiones en el modelo 1	
Figura 105. Gráfica del factor de seguridad para el modelo 1	
Figura 106.Tensiones en el modelo 2	
Figura 107. Gráfica del factor de seguridad para el modelo 2	
Figura 108.Tensiones en el modelo 3	
Figura 109.Gráfica del factor de seguridad para el modelo 3	
Figura 110.Vista líneas de flujo Pos proceso	
Figura 111.Tabla de resultados	
Figura 112.Resultados gráficos en contorno de presiones	
Figura 113. Resultados gráficos en contorno de presiones sobre superficie	
Figura 114. Resultados gráficos de trayectoria de flujo para valores de velocidad	
Figura 115.Resultados gráficos en contorno de valores de velocidad	
Figura 116. Vista líneas de flujo pos-proceso modelo 2	
Figura 117.Tabla de resultados modelo 2	
Figura 118.Resultados gráficos en lineas isobaricas de modelo 2	
Figura 119.Resultados gráficos en líneas isobáricas sobre superficie modelo 2	
Figura 120.Resultados gráficos de trayectoria de flujo para valores de velocidad modelo) 2 ?
Figura 121.Resultados gráficos en contorno de valores de velocidad modelo 2	
Figura 122. Tabla de resultados modelo 3	
Figura 123. Resultados gráficos en contorno de presiones modelo 3	
Figura 124. Resultados gráficos en contorno sobre superficie modelo 3	2
Figura 125.Resultados gráficos de trayectoria de flujo para valores de velocidad modelo) 3 :
Figura 126.Resultados gráficos en contorno de valores de velocidad modelo 2	
Figura 127.Resumen resultados modelado	
Figura 128.Resumen resultados análisis estáticos	
Figura 129. Resumen resultados análisis aerodinámicos	
Figura 130. Archivos CAD entregables.	



PÁGINA 15 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

LISTA DE TABLAS



PÁGINA 16 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Tabla 1. Características significativas de la resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio
Tabla 2. Resultados en resumen de las tres propuestas
Tabla 3. Resultados de simulación aerodinámica propuesta 1
Tabla 4.Resultados de simulación aerodinámica propuesta 2
Tabla 5.Resultados de simulación aerodinámica propuesta 3
Tabla 6. Resultados en resumen de las tres propuestas
Tabla 7. Resumen total de datos para selección de carrocería
Tabla 8. Resultados de resistencia por rodadura
Tabla 9. Resultados de la resistencia por inercia
Tabla 10. Resultados de la resistencia por acción del viento
Tabla 11 Resultados de ecuación de movimiento total



PÁGINA 17 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio trata sobre el diseño de una carrocería de un vehículo para lograr una exitosa participación en la categoría prototipo de la competencia Shell Eco Marathon, por parte de las Unidades Tecnológicas de Santander. Primeramente, se revisaron los parámetros y condiciones generales que impone la competencia en materia de diseño de la carrocería y sus reglas. Posteriormente se crearon tres diferentes propuestas que responden adecuadamente a las acotaciones hechas por los anfitriones en el reglamento de la competición.

De estos modelos se presentan sus correspondientes análisis estáticos por el método de elementos finitos, análisis de los cuales se obtuvo el factor de seguridad, cuya finalidad era validar el uso de la fibra de vidrio para una próxima fabricación de la carrocería. Así mismo, se ejecutó una simulación del comportamiento aerodinámico de las propuestas, del cual se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos de arrastre y de sustentación, que serían claves para la definición de un único prototipo.

En la última parte del trabajo se seleccionó un único modelo basándose en criterios de masa y coeficientes aerodinámicos. A partir de esta selección se elaboraron los planos técnicos del modelo final que se usarán en una posible construcción del vehículo, y se expusieron las diferentes conclusiones y recomendaciones según la experiencia propia del trabajo desarrollado.

PALABRAS CLAVE. Aerodinámica, carrocería, CAD, CFD, diseño.



PÁGINA 18 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

INTRODUCCIÓN

Es en el marco de la competencia "Shell eco marathon" donde se ubica el proyecto expuesto a continuación. Esta competición de eficiencia energética reúne a estudiantes de ciencias, tecnología, ingeniería y matemáticas para invitarlos no solo al diseño sino a la construcción de vehículos de alta eficiencia energética para posteriormente llevarlos a la pista de competencia entre ellos. Este programa tan llamativo para cualquier ingeniero en formación invita a un sinfín de estudiantes alrededor del mundo a trabajar en equipo y poner a prueba sus aportes y teorías de eficiencia energética utilizando tecnología de punta e ideas innovadoras propias de una generación de estudiantes universitarios.

Existen dos competiciones globales dentro de la marathon, estas son: el campeonato mundial de pilotos de "Shell eco Marathon" y la "Shell Eco-marathon Mileage Challenge". Es en esta última en donde se sitúa la intervención de las Unidades Tecnológicas de Santander y por ende este proyecto.

El principal interés del presente proyecto de investigación reside en la aplicación de la dinámica computacional (CFD) que permite la realización del modelado de la carrocería del vehículo en un archivo de dibujo asistido por computadora (CAD) y además la simulación del comportamiento aerodinámico de la carrocería. A partir del diseño se construirá el vehículo que participará en la mencionada competición. En este trabajo se estudian los seis parámetros y restricciones de diseño acotadas por el organizador del evento para poder producir un modelo exitoso en esos términos, la generación del perfil en 2D y la extracción y modelamiento en 3D.



PÁGINA 19 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los estudiantes del programa de ingeniería electromecánica participarán en la "Shell eco Marathon", una competencia mundial, en donde se explotan las capacidades de innovación en materia de diseño y construcción de vehículos con eficiencias energéticas de alto nivel.

Es claro que el bajo consumo energético del vehículo es el objeto principal de cualquier proyecto que tenga como foco la intervención en el diseño y construcción de un auto para esta competición. Dentro de los factores que intervienen a la hora de pretender ahorrar consumo de energía encontramos el peso total del vehículo, siendo uno de los tópicos más importantes y en donde la carrocería juega un papel crucial.

En este proyecto se ven como principales involucrados la comunidad de estudiantes UTS mediante los semilleros de investigación del programa de Ingeniería Electromecánica y con la puesta en marcha de este proyecto también participan los profesores quienes se ven involucrados en este proyecto como directores, codirectores, y/o evaluadores.

A partir de la observación de los antecedentes de la competición es fácil concluir que de los diseños tradicionales de carrocerías no se obtienen carrocerías livianas, lo que se traduce como una deficiente eficiencia energética y alto consumo del vehículo. A partir de esta problemática se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Es posible diseñar una carrocería exterior eficiente en términos aerodinámicos, utilizando como herramienta la dinámica computacional, de tal manera que permita generar como producto un modelo para la construcción del vehículo con el que competirá las Unidades Tecnológicas de Santander en la "Shell Eco Marathon"?



PÁGINA 20 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1.2. JUSTIFICACIÓN

Entre los propósitos de los grupos de investigación adscritos al programa de Ingeniería Electromecánica de las UTS al querer participar en competencias internacionales, es poder fortalecer la interacción de los grupos de investigación con otras IES, además, aprovechar oportunidades donde la institución sea reconocida por incentivar a los estudiantes en la investigación aplicada y consecuentemente brindar a los estudiantes espacios donde se motive el sentido de pertenencia.

Los grupos de investigación del programa de Ingeniera Electromecánica desarrollan líneas de trabajo en la utilización y optimización de energías alternativas, entre esas áreas de trabajo se encuentra el estudio de energías aplicadas en el área automotriz.

El conocimiento del diseño en la industria automotriz motiva a querer explorar las diferentes posibilidades que se pueden encontrar durante el desarrollo de productos que favorezcan el ahorro de combustible. El semillero de investigación en Ingeniería Automotriz SIIMA, buscando fortalecer sus líneas de investigación, plantea desde la concepción de diferentes proyectos, el diseño y construcción de un vehículo de alta eficiencia energética. En donde cada componente del automóvil y cada fase de manufactura y construcción son importantes para lograr obtener una mejora y ahorro en la cantidad de energía utilizada versus el kilometraje recorrido por el vehículo.

Por lo tanto, es imprescindible diseñar una carrocería externa con características aerodinámicas estudiadas y cabalmente calculadas para conseguir el menor peso posible con el fin de minimizar el peso del vehículo e igualmente una oposición mínima al flujo de aire, todo esto destinado finalmente a disminuir el consumo energético.



PÁGINA 21 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar aerodinámicamente la carrocería exterior de un vehículo deportivo para la competencia "Shell eco marathon" en la categoría prototipo, mediante el uso de la dinámica computacional.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar y ensamblar los componentes de la carrocería de un vehículo que cumplan con las especificaciones de la competencia "Shell eco marathon" en la categoría prototipo, usando el programa de diseño asistido por computador Solid Works®, para generar el modelo geométrico que permitirá el estudio del perfil creado.
- Realizar análisis estático al modelo de la carrocería por el método de elementos finitos utilizando el software Solid Works® para validar el material del modelo.
- Simular el comportamiento aerodinámico de la carrocería del vehículo usando la herramienta Flow Simulation del software Solid Works®, para determinar los coeficientes de arrastre (CD) y sustentación (CL), mediante la comparación de los resultados obtenidos computacionalmente por otros vehículos que han participado en la competencia Shell Eco Marathon con el propósito de definir la geometría final.
- Dibujar los planos técnicos del modelo finalmente obtenido a partir de la herramienta dibujo del software Solid Works® en formato A2 y según la norma ISO.

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

A continuación, se muestran algunos trabajos sobre la carrocería de un vehículo prototipo realizado por equipos universitarios y trabajos relacionados con la participación en ediciones anteriores de la competición SEM.



PÁGINA 22 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1.4.1. ANALISIS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA PARA EL PROTOTIPO DE COMPETENCIA POR PARTE DE LA UNIVERSIDAD DE AZUAY

La escuela de ingeniería en mecánica automotriz de la universidad del Azuay de Cuenca Ecuador, mediante un grupo de dos estudiantes quienes aspiraban al título de ingenieros en mecánica automotriz, propusieron en primera estancia una revisión de las diferentes carrocerías con las que han competido otros equipos en años anteriores.

De este estudio se presentaron dos propuestas, posteriormente se ejecutó un análisis CFD, del cual se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos de arrastre y sustentación (Cajamarca D.; Vásquez C, 2016).

En la tercera parte del proyecto se seleccionó una de las propuestas basándose en criterios de visibilidad, accesibilidad, masa, coeficientes aerodinámicos para favorecer el consumo energético y en la parte final del trabajo se presenta los diferentes pasos que se realizaron para la construcción del prototipo (Cajamarca D.; Vásquez C, 2016).



Figura 1. Ilustración trabajo final de la Universidad Azuay

Fuente: Cajamarca D.; Vásquez C, 2016



PÁGINA 23 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1.4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA DE UN PROTOTIPO PARA LA COMPETICIÓN SHELL ECO-MARATHON

En este proyecto de la universidad de Murcia se realiza el estudio aerodinámico de la carrocería del vehículo diseñado para la competición Shell Eco-Marathon. Partiendo de un diseño en CAD, con la utilización de superficies NURBS, que cumple con la normativa de la competición, se realiza un mallado del prototipo para realizar una simulación con CFC de su comportamiento aerodinámico, cuyos resultados indican mejoras de diseño. Se ha construido la carrocería con materiales ligeros utilizando técnicas de astillero y se mejorado en los resultados en la competición (Alarcón M.; Morales J.; Gómez I.; González A, 2017).

Se ha diseñado la carrocería de un prototipo para participar en la competición Shell Eco-Marathon. Sujeto a las restricciones que impone la normativa de la competición, se realizó un diseño inicial en CAD, trabajando con curvas NURBS para superficies específicas. Se ha mallado el diseño original para la simulación mediante CFD. El análisis de los resultados ha ofrecido una serie de indicaciones para mejorar el diseño original desde el punto de vista fluido dinámico (Alarcón M.; Morales J.; Gómez I.; González A, 2017).

En conclusión, en este trabajo de los estudiantes de la Universidad de Murcia su aporte más significativo para mi interés particular es que a la hora del diseño de la carrocería no recomiendan una proliferación excesiva de regiones en que no hay concavidad ni convexidad, puesto que afectan de igual modo al comportamiento del fluido en la capa límite de la carrocería.

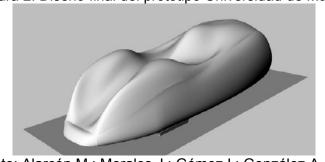


Figura 2. Diseño final del prototipo Universidad de Murcia

Fuente: Alarcón M.; Morales J.; Gómez I.; González A, 2017

PÁGINA 24 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1.4.3. PROPUESTA METODOLÓGICA EN EL ÁMBITO DE LA MECATRÓNICA: VEHÍCULOS DE COMPETICIÓN DE ALTA EFICIENCIA

El principal interés de la tesis reside en la aplicación de las metodologías mecatrónicas para el diseño y fabricación de un vehículo prototipo de alta eficiencia para la participación en competiciones de nivel internacional. El método descrito se aplicó como ejemplo a la forma exterior del vehículo.

En el diseño y fabricación de estos vehículos se deben cumplir unos principios básicos de eficiencia y seguridad. En este trabajo se procedió a realizar las siguientes acciones:

- Estudio de las diferentes metodologías mecatrónicas.
- Estudio de la reglamentación en cuanto a medidas de seguridad.
- Estudio de las restricciones de diseño impuestas por nuestro tipo de vehículo (dirección delantera, motor de combustión, etc.).
- Establecimiento de la metodología.
- Diseño en 2D del perfil aerodinámico óptimo.
- Diseño de la carrocería en 3D y su posterior, perfeccionamiento del diseño a partir de un estudio CFD (Computation Fluid Dynamics).
- Proceso de Fabricación de la carrocería.

Se han descrito posteriormente los logros obtenidos con el diseño de la carrocería actual, así como las publicaciones relacionadas con esa tesis (Romero V, 2013).

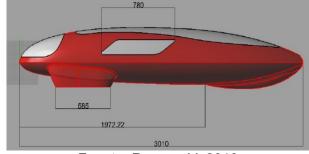


Figura 3. Modelo final de la propuesta de tesis doctoral

Fuente: Romero V, 2013



PÁGINA 25 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1.4.4. ESTUDIO Y DISEÑO DEL CARROZADO DE UN PROTOTIPO PARA COMPETIR EN SHELL ECO-MARATHON

El objetivo de este trabajo fue el diseño y estudio de fabricación de un chasis y carenado óptimo que cumpla las características de la competición SEM, esto es, contribuir a minorar el consumo energético mediante la aerodinámica y la reducción de peso. Se puede fijar que el objetivo de este trabajo se divide en dos partes principales, la primera el diseño de un chasis que pueda ser fácilmente construible en cualquier empresa de calderería y un carenado adecuado al diseño del chasis anterior. El segundo objetivo se resume en el estudio del proceso de fabricación más adecuado a los elementos anteriormente diseñados y le obtención de un presupuesto real de dichos procesos.

El diseño estuvo sujeto a las condiciones impuestas por la competición, las limitaciones derivadas del diseño de otras partes del vehículo realizadas por otros miembros integrantes, así como las posibilidades disponibles de simulación y la fabricación por parte de la universidad Carlos III. Se tomará como predecesores los diseños obsoletos por otros integrantes del equipo dedicado a esta competición.

Por ello, este proyecto se ha realizado con la colaboración del resto de integrantes de la asociación Shell Eco- UC3M y optimizando los recursos, como puede ser la realización de un estudio aerodinámico mediante software CFD (Computed Fluid Dynamics), estudio estructural mediante un programa de FEA (Finite Element Analysis) y presupuesto del proyecto con colaboración de empresas (Manzanaque P, 2015).

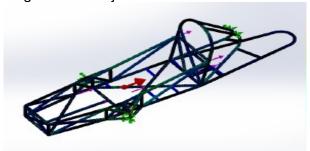


Figura 4. Trabajo final Universidad Carlos III

Fuente: Manzanaque P, 2015.



PÁGINA 26 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

1.4.5. ESTUDIO DE LOS MODELOS DE TURBULENCIA APLICADOS A LA AERODINÁMICA EXTERNA DE UN AUTOMÓVIL, MEDIANTE SOFTWARE DE DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS

Este proyecto colombiano es del año 2016 en este trabajo se presentan los resultados obtenidos en el proyecto de investigación ING010-015 avalado por la Universidad de San Buenaventura. Se estudiaron los métodos de turbulencia S-A, k-e, k-w y k-kl-w aplicados a la aerodinámica externa de un automóvil con un número de Reynolds igual a 968.000 en un software de dinámica de fluidos computacional; las simulaciones fueron realizadas con flujo estable e inestable y dos tipos de enmallados.

En el análisis se estudió la convergencia del coeficiente de resistencia al avance comparado con resultados experimentales obtenidos en pruebas en el túnel de viento. El objetivo principal del estudio es determinar el método de turbulencia más acertado para ser utilizados en simulaciones mediante software de dinámica computacional de fluidos teniendo en cuenta los resultados computacionales y los experimentales.

El vehículo fue diseñado por el grupo de investigación AeroTech, teniendo en cuenta la reglamentación estipulada en la competencia Shell Eco-Marathon. Los métodos de turbulencia Reynolds-Averaged Navier-Stokes RANS utilizados fueron Spalart Allmaras, k- ϵ , k- ω y k-kl- ω , debido a que no requieren demasiados recursos computacionales, tal como RSM y LES.

Para el desarrollo de las simulaciones se realizaron estudios previos de convergencia de malla, para determinar el número de nodos y el tipo de enmallado correcto para obtener simulaciones con gran precisión, menor uso de capacidad computacional y tiempo de simulación (Cerpa R.; Nieto E.; Londoño L, 2016).



PÁGINA 27 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

2. MARCOS REFERENCIALES

2.1. DINAMICA DE FLUIDOS

La dinámica de fluidos estudia los fluidos en movimiento y es una de las ramas más complejas de la mecánica.

Aunque cada gota de fluido cumple con las leyes del movimiento de Newton las ecuaciones que describen el movimiento del fluido pueden ser extremadamente complejas. En muchos casos prácticos, sin embargo, el comportamiento del fluido se puede representar por modelos ideales sencillos que permiten un análisis detallado (Cengel & Cimbala, 2006).

2.1.1. FLUIDOS COMPRESIBLES EN COMPARACIÓN CON LOS INCOMPRESIBLES

Un fluido se clasifica como compresible o incompresible en función de la variación de la densidad del mismo durante el flujo. Un fluido es incompresible si su densidad permanece casi constante a lo largo de todo el flujo, en consecuencia, el volumen de todo el fluido no se altera. Los líquidos son sustancias incompresibles, ya que, sus densidades son constantes durante el flujo, como por ejemplo el agua. Lo contrario son los gases, estos son intensamente compresibles, por ejemplo, un cambio de presión de 0.01atm produce la variación de 1 por ciento en la densidad del aire atmosférico (Cengel & Cimbala, 2006).

2.1.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

PRESIÓN

Se le conoce como presión a la relación existente entre la fuerza normal (F) aplicada a una superficie y el área de acción (A). Se debe tener en cuenta que cuando se trata de un fluido la fuerza se encuentra perpendicular al plano definido por dicho fluido o a la superficie que se encuentra en contacto. La ecuación de presión es:

$$P = F/A \tag{0}$$

En donde:

P: Presión (Pa) F: Fuerza (N) A: Área (m²)

PÁGINA 28 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

DENSIDAD

La densidad está definida como masa por unidad de volumen. Por lo general la densidad de una sustancia va a depender de la temperatura y de la presión. En los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura, mientras que en sólidos y líquidos al tratarse de sustancias incompresibles la variación de su densidad con la presión se asume como despreciable (Cengel & Cimbala, 2006). Entonces:

$$\varrho = m/v \tag{0}$$

En donde:

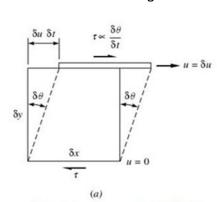
ρ: densidad (kg/m3), m: masa (kg), v: volumen (m3)

VISCOSIDAD

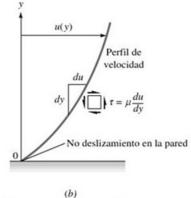
Se define a la viscosidad como una medida cuantitativa de la resistencia de un fluido a fluir, la viscosidad se emplea para determinar la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante dado (White, 2004).

En la ley de Newton referente a la viscosidad, se establece que para una cierta deformación angular de un fluido (du/dy) considerando que du es la velocidad y dy la distancia, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad (Pauta Solano & Sánchez Ramírez, 2014), se tiene:

Figura 5. Esfuerzo cortante







Esfuerzo cortante en un fluido newtoniano en la zona cercana a la pared.



PÁGINA 29 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Fuente: White, 2004

En la figura 1.a se observa una partícula fluida sometida a un esfuerzo cortante (τ) en un plano. El ángulo ($\delta\Theta$) de la deformación aumentará continuamente con el tiempo mientras siga actuando el esfuerzo (τ) y moviéndose la superficie superior con una velocidad (δ u) mayor que la de la inferior (White, 2004).

$$\tau = \alpha \frac{\delta \theta}{\delta t} \tag{0}$$

Considerando el triángulo rectángulo que se forma en la figura 1.1a se tiene:

$$tg\delta\theta = \frac{\delta u \cdot \delta t}{\delta y} \tag{0}$$

Cuando se tiene límite de variaciones infinitesimales, se genera una relación entre la velocidad de deformación y el gradiente de velocidad:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta t} \tag{0}$$

En la ecuación (5) se observa que el esfuerzo aplicado es también proporcional al gradiente de la velocidad para fluidos comunes. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de viscosidad (μ) , por lo tanto:

$$\tau = \mu \frac{\delta \theta}{\delta t} = \mu \frac{\delta u}{\delta y} \tag{0}$$

En donde:

δΘ/δt: Velocidad de deformación. τ: Esfuerzo cortante (Pa) μ: Coeficiente de viscosidad absoluta (Pa.s o Kg/m.s) du/dy: Gradiente de velocidad (1/s)



PÁGINA 30 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

2.1.3. NÚMERO DE REYNOLDS

El movimiento de un fluido puede realizarse de dos formas ya sea en régimen laminar o turbulento, difieren el uno del otro en el comportamiento de las partículas en movimiento.

El número de Reynolds (Re) es un valor adimensional, empleado para identificar el tipo de régimen, Entonces:

Relaminar<< Recrítico<< Returbulento

Los valores del número de Reynolds fueron obtenidos de manera experimental observando el flujo en una tubería circular. El régimen laminar ocurre para Re<2300, mientras que para el turbulento ocurre para Re>4000. En el intervalo entre 2300 y 4000 se tiene un régimen de transición, es decir se puede encontrar tanto el laminar como el turbulento (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014), se tiene:

$$\Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \tag{0}$$

En donde:

Re: Número de Reynolds (adimensional) V: Velocidad del fluido (m/s) L: Longitud del campo de flujo (m)

2.1.4. REGIMÉN LAMINAR

Las partículas se mueven describiendo una trayectoria sumamente ordenada, formándose capas o láminas, es decir el fluido se mueve sin que haya una combinación significativa de partículas de fluido vecinas. En la práctica la gran mayoría de flujos son turbulentos, teniéndose laminares en fluidos muy viscosos que fluyen en pequeñas tuberías o pasajes muy estrechos.

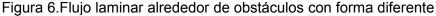


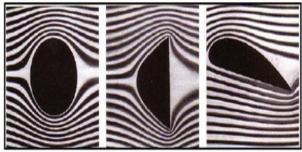
PÁGINA 31 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01





Fuente: Young & Freedman, 2009

2.1.5. FLUJOS ESTACIONARIOS Y NO ESTACIONARIOS

El término estacionario hace referencia a que no existe un cambio en un punto con el tiempo. Es decir, características de un fluido como son presión, densidad y velocidad permanecen constantes durante el flujo.

Ejemplos de equipos de flujo estacionario son turbinas, compresores, las calderas, condensadores y los intercambiadores de calor, dichos equipos trabajan largos periodos de tiempo en las mismas condiciones. En el flujo estacionario las propiedades de un fluido pueden variar de un punto a otro dentro de un equipo, pero siendo constantes en cualquier punto fijo.

En consecuencia, el volumen, la masa y la energía total de un equipo de flujo estacionario permanecen constantes durante su operación (Cengel & Cimbala, 2006).

2.1.6. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO

El flujo puede ser visualizado de distintas maneras, con representaciones gráficas y fotografías se pueden conocer aspectos de este. Existen cuatro formas para la descripción de un fluido, las cuales son:

- Líneas de corriente.
- Líneas de trayectoria o senda.
- Líneas de traza.
- Líneas fluidas.

2.1.7. CAPA LÍMITE

La capa límite es una región de fluido de espesor pequeño (δ) y de gran longitud X, que se encuentra situada alrededor de cualquier cuerpo aerodinámico o en el interior de conductos, en la cual su velocidad es afectada por los esfuerzos cortantes, dicha capa se



PÁGINA 32 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

puede encontrar adherida al cuerpo o separada de él. Dependiendo del número de Reynolds, la capa límite puede ser laminar o turbulenta (Bergadá Grañó, 2012). Características generales de la capa límite:

- La capa límite es una región muy delgada, su espesor (δ) es menor que la longitud respecto al inicio de la placa.
- Conforme aumenta el flujo, es decir corriente abajo, el espesor de la capa límite aumenta cumpliéndose siempre (δ) <X.
- El perfil de velocidades de la capa límite cumple con la condición de no deslizamiento en la pared.
- Los esfuerzos cortantes sobre la superficie de la pared siempre se consideran.
- En el interior de la capa límite las líneas de corriente del flujo se pueden considerar aproximadamente paralelas a la placa.

V_∞ = U_∞

V_∞

V_∞

V_∞

V_∞

V_∞

δ

Líneas Distribución de Esfuerzos cortantes

Figura 7. Evolución de la capa límite

Fuente: Bergadá Grañó, 2012

2.1.8 AERODINAMICA DE LOS VEHICULOS

Hoy en día la aerodinámica es un tema de estudio fundamental en el diseño de vehículos tanto de turismo como de competencia. El flujo de aire que circula alrededor de un vehículo genera fuerzas de arrastre (Drag) y sustentación (Lift) la misma que puede ser positiva o negativa, además de momentos, fuerzas laterales, ruidos, vibraciones, etc. que afectan el desplazamiento del automóvil.

2.1.9 FUERZAS AERODINAMICAS PRESENTES EN EL MOVIMIENTO DE UN VEHICULO

"La fuerza sobre un cuerpo pude tener tres componentes: resistencia o arrastre, sustentación y fuerzas laterales" (Bergadá Grañó, 2012).



PÁGINA 33 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

2.1.9.1 FUERZA DE ARRASTRE

La fuerza de arrastre (FD) es la que el flujo de un fluido ejerce sobre un cuerpo, es decir genera una resistencia al movimiento de dicho cuerpo, en los vehículos esta fuerza es producida por acción del viento.

Normalmente el arrastre es un efecto indeseable y siempre se trata de buscar soluciones para eliminarlo, por ejemplo, en vehículos el arrastre se relaciona con el consumo de combustible. Pero en ciertos casos el arrastre es un fenómeno deseable e incluso se trata de maximizarlo como por ejemplo en los frenos de los automóviles, paracaídas, etc.

2.1.9.2 COEFICIENTE DE ARRASTRE AERODINÁMICO

Es un valor adimensional (CD), que se emplea para evaluar la calidad aerodinámica del perfil de una carrocería, el coeficiente de arrastre depende de factores como: forma del vehículo, número de Reynolds, y la rugosidad de la superficie.

"En muchas ocasiones el coeficiente de arrastre aerodinámico (CD) se considera como una constante que depende únicamente de la forma que tiene el cuerpo y de la dirección de su movimiento en un fluido en reposo" (González Santander Martínez & Castellano Estornell 2014).

Figura 8. Coeficientes de arrastre experimentales para diferentes formas con Re>104.

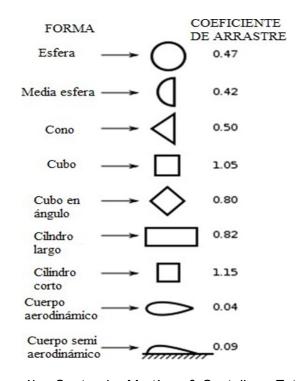


PÁGINA 34 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



Fuente: González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014

2.1.9.3 ARRASTRE DEBIDO A FRICCIÓN Y PRESION

Como se mencionó la fuerza de arrastre se origina por los efectos combinados de las fuerzas de fricción y de presión.

2.1.9.4 RESISTENCIA DEBIDO A FRICCION

La viscosidad presente en el aire da lugar al rozamiento entre el fluido y la superficie del cuerpo, lo que genera una fuerza tangencial (тs), siendo esta una primera componente de los esfuerzos que el flujo genera sobre un cuerpo.



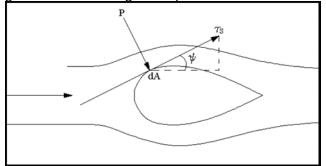
PÁGINA 35 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01





Fuente: Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009

"El coeficiente de arrastre debido a fricción es independiente de la rugosidad de la superficie en flujo laminar, pero es una fuerte función de la rugosidad de la superficie en flujo turbulento, debido a los elementos de rugosidad superficiales que sobresalen de la capa límite" (Cengel & Cimbala, 2006).

2.1.9.5 RESISTENCIA DEBIDO A LA PRESIÓN

El flujo laminar y turbulento presentes en la capa límite sobre la superficie del cuerpo, dan lugar a una distribución de presiones a lo largo del cuerpo, al momento de tener un aumento de presiones en la dirección del flujo, la fuerza entre el fluido y el cuerpo aumenta, disminuyendo el flujo (Pauta Solano & Sánchez Ramírez, 2014).

2.1.10 ECUACIONES PRESENTES EN EL MOVIMIENTO DE UN FLUIDO

2.1.10.1 ECUACIÓN DE BERNOULLI

Es una relación aproximada entre la velocidad, la elevación y la presión. La ecuación o principio de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Establece que en un fluido sin viscosidad y sin rozamiento en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee dicho fluido permanece constante a lo largo de su recorrido (Ortiz Flórez, 2011).

Por lo dicho anteriormente la ecuación de Bernoulli no puede ser aplicada en cualquier parte de un flujo únicamente en regiones no viscosas, es decir en sectores fuera de las capas límites y estelas, en donde el movimiento del fluido es regido por los efectos de la presión y la gravedad (Cengel & Cimbala, 2006).



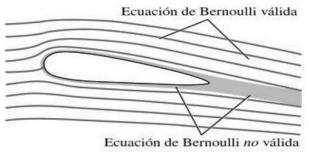
PÁGINA 36 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 10. Regiones válidas de la ecuación de Bernoulli.



Fuente: Cengel & Cimbala, 2006

Teniendo en cuenta que la suma de la energía cinética, la potencial y de flujo de una partícula es constante, en el trascurso de una línea de corriente de un flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables se tiene:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = C \tag{0}$$

En donde:

o. g. h: Energía potencial gravitacional.

P: Presión estática.

ρ v2: Energía cinética con la que se desplaza el fluido.

C: Constante

2.1.10.2 ECUACION DE CONTINUIDAD

La ecuación de continuidad o de conservación de la masa, establece que la variación de la masa contenida en un volumen fluido es nula con respecto al tiempo (Barrero Ripoll & Perez-Saborid Sánchez-Pastor, 2005). La ecuación de continuidad es:

$$\frac{\delta P}{\delta t} + \dot{c} \nabla \cdot (pv) = 0 \tag{0}$$

En donde:

 ∂P : Variación con el tiempo de la masa contenida en la unidad de volumen (kg/m3.s) ∂t o variación de la densidad con respecto al tiempo

 ∇ . (ϱv): Flujo de masa que abandona la unidad de volumen.

2.1.11 REGIMEN TURBULENTO

El régimen turbulento se caracteriza por un campo de velocidades extremadamente irregular y fluctuante, que se origina cuando el número de Reynolds supera un cierto valor



PÁGINA 37 DE 132

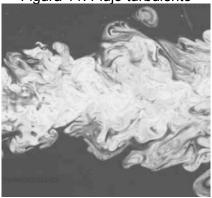
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

crítico. En el flujo turbulento, la velocidad del fluido en un determinado punto está continuamente oscilando (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014).

Figura 11. Flujo turbulento



Fuente: González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014.

2.1.11.1 MODELADO DE LA TURBULENCIA

Los modelos de turbulencia son procedimientos numéricos que relacionan los valores medio de las fluctuaciones con los valores promedio de las variables, de tal manera que sea posible resolver las ecuaciones de gobierno.

Entonces un modelo de turbulencia será adecuado en un software CFD si posee una alta precisión, sencillez y sobre todo que sea económico (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009). Se tiene los siguientes modelos:

- Modelo K-8.
- Modelo RNG.
- Modelo K-omega.

MODELO K-ÉPSILON (K-ε)

Se trata de una alternativa numérica que permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes con gran exactitud. El modelo k- ϵ , es un modelo de viscosidad turbulenta, en donde, el coeficiente de viscosidad turbulenta se modela localmente como una función de la energía cinética turbulenta k, y de la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ϵ (Barrero Ripoll & Perez-Saborid Sánchez-Pastor, 2005).

Ventajas y desventajas del modelo K-E: (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009):

Ventajas:

• Es posible obtener resultados bastante exactos para una gran cantidad de flujos.

Unidades Tecnológicas de Santander

DOCENCIA

PÁGINA 38 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

- En la industria automotriz es el modelo de turbulencia que más se emplea.
- Únicamente es necesario establecer las condiciones iniciales de operación y las de contorno.

Desventajas:

- Se requiere un tiempo de iteración considerablemente mayor.
- Los resultados obtenidos para flujos confinados y flujos con grandes gradientes longitudinales son poco satisfactorios.

MODELO RNG

Es empleado para determinar la formación de vórtices, comportándose adecuadamente en flujos con gradientes de presión adversos. Además, permite tener en cuenta los efectos de un bajo número de Reynolds, presenta el inconveniente de que es necesaria una configuración de leyes de pared, lo que se transforma en un incremento del costo computacional (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009).

MODELO K-OMEGA

Se trata de uno de los modelos de turbulencia más empleados. Es un modelo de dos ecuaciones, es decir, trabaja con dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades de turbulencia del flujo. La primera es la energía cinética turbulenta (k) es la y la segunda es la disipación específica (Pauta Solano & Sánchez Ramírez, 2014).

2.2. DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Tiene como objetivo la simulación del flujo de fluidos y los procesos de transferencia de calor. Se basa en la utilización de métodos numéricos para resolver ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momento y la energía en el seno de un fluido (C. A. Barazal, 2002).

Los paquetes comerciales CFD tratan de proporcionar interfaces amigables para el modelado de las geometrías y la introducción de los parámetros de resolución. Habitualmente, suelen incorporar también un módulo adicional para facilitar el análisis y la presentación de resultados, siguiendo una estructura de tres procesos los cuales son: (Fernández, 2012).

PRE-PROCESO: Aquí se introducen los datos de entrada para la resolución en donde se puede encontrar:



PÁGINA 39 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

- Definición de la geometría a modelizar: el dominio computacional
- Generación de la malla o división del dominio en un número suficiente de celdas o elementos que no se superpongan y que cubran toda la geometría
- Identificación de los fenómenos físicos y químicos que pretenden modelarse
- Definición de las propiedades del fluido (o fluidos)
- Especificación de las condiciones iniciales y de contorno del problema

SOLVER: Constituye la parte central del programa de resolución y es el encargado de resolver de forma iterativa las ecuaciones que se han activado previamente en el preproceso (los modelos) (Fernández, 2012).

POST PROCESO: Es un módulo que cuenta con herramientas gráficas que permiten analizar los resultados esta incluye:

- Representación gráfica del dominio y la malla
- Mapas de contornos de las variables y ploteado de vectores y líneas de corriente
- · Gráficas y distribuciones
- Gráficas de superficies bidimensionales y tridimensionales

2.2.7. MALLADO ESTRUCTURADO

Cada punto de la malla esta inequívocamente identificado las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D.

Figura 12. Malla estructurada

Fuente: Tizón, 2010.

2.2.2 MALLADO NO ESTRUCTURADO

Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular es decir las celdas o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente, los elementos de malla



PÁGINA 40 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

en este caso son una mezcla de cuadriláteros y triangulares en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D.



Fuente: Tizón, 2010.

2.2.3 MODELADO Y ANALISIS AERODINAMICO USANDO UN SOFTWARE CAD (DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA)

2.2.3.1 CAD

El diseño asistido por ordenador (CAD) consiste en el uso de programas de ordenador para crear, modificar, analizar y documentar representaciones gráficas bidimensionales o tridimensionales (2D o 3D) de objetos físicos como una alternativa a los borradores manuales y a los prototipos de producto.

El CAD se utiliza mucho en los efectos especiales en los medios y en la animación por ordenador, así como en el diseño industrial y de productos.

El CAD se utiliza a lo largo de todo el proceso de ingeniería, desde el diseño de productos conceptual y la estructura pasando por el análisis de ensambles hasta la definición del método de fabricación. El CAD permite a los ingenieros probar de forma interactiva las variantes de diseño con el número mínimo de prototipos físicos, con el objetivo de:

- -Reducir los costes de desarrollo de productos
- -Ganar velocidad
- -Mejorar la productividad
- -Asegurar la calidad
- -Reducir el tiempo de lanzamiento al mercado

2.2.3.2 SOFTWARE CAD "SOLIDWORKS ® "



PÁGINA 41 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

SolidWorks es un software CAD (Dibujo y Diseño asistido por computador) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Su primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

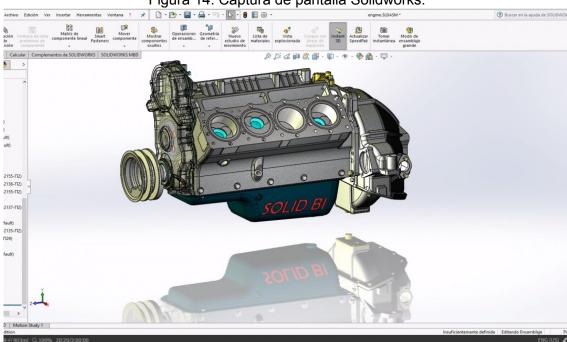


Figura 14. Captura de pantalla Solidworks.

Fuente: (Solidworks corp, 2019)

En la figura 14 por ejemplo, se puede ver un ensamblaje de un motor de combustión interna dibujado en el software.

2.2.3.3 COMPLEMENTO SOLIDWORKS FLOW SIMULATION



PÁGINA 42 DE 132

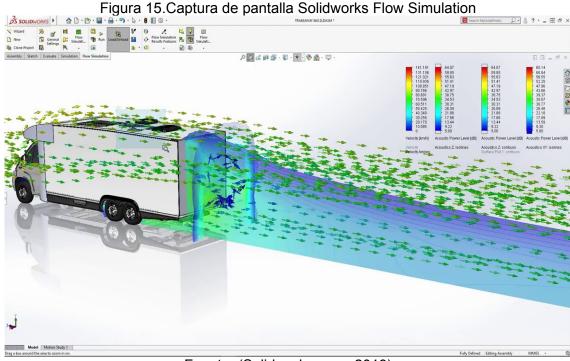
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Es un complemento del software que permite simular el flujo de fluidos, la transferencia del calor y las fuerzas de fluidos cuando estas interacciones sean vitales para el éxito de sus diseños.

SOLIDWORKS Flow Simulation es una intuitiva solución de dinámica de fluidos computacional (CFD, del inglés "Computational Fluid Dynamics") integrada en SOLIDWORKS 3D CAD que le permite simular de forma rápida y sencilla flujos de líquido y gas a través y alrededor de sus diseños para calcular así el rendimiento y las capacidades del producto.



Fuente: (Solidworks corp, 2019)

En la figura 15 se pueden observar las ilustraciones que llega a arrojar el complemento de Flow simulation al momento de hacer una simulación.



PÁGINA 43 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

2.3. INDICADORES DE DISEÑO

2.3.1. FACTOR DE SEGURIDAD

El coeficiente de seguridad (también conocido como factor de seguridad) es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido. Por este motivo es un número mayor que uno, que indica la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos.

En los cálculos de resistencia mecánica, el factor de seguridad se aplica principalmente de dos maneras:

- Multiplicando el valor de las solicitaciones o fuerzas que actúan sobre un elemento resistente por un coeficiente mayor a uno (coeficiente de mayoración). En este caso se calcula como si el sistema fuera solicitado en mayor medida de lo que se espera que lo sea en la realidad.
- Dividiendo las propiedades favorables del material que determinan el diseño por un número mayor que uno (coeficiente de minoración). En este caso se modela el material como si fuera peor de lo que se espera que sea.

En ambos casos el resultado es el mismo: un sobredimensionamiento del componente.

2.3.2. TENSION DE VON MISES

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

$$\sigma vm = \sqrt{\frac{(\sigma 1 - \sigma 2)^2 + (\sigma 2 - \sigma 3)^2 + (\sigma 3 - \sigma 1)^2}{2}}$$
 (0)

La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado debe su nombre a Richard Edler von Mises (1913) propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor. Sin embargo, el criterio fue claramente formulado con anterioridad por Maxwell en 18651 más tarde también Huber (1904), en un artículo en polaco anticipó hasta cierto punto la teoría de fallo de Von Mises.2 Por todo esto a veces se llama a la teoría de fallo elástico basada en la tensión de Von Mises como teoría de Maxwell-Huber-Hencky-von Mises y también teoría de fallo J2.

PÁGINA 44 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

3.1. MODELADO Y ENSAMBLAJE

En esta primera etapa del desarrollo del trabajo se definió en el software de dibujo asistido por computador Solid Works ® las propuestas de modelo final de los diferentes prototipos.

3.1.1. REQUERIMIENTOS PREVIOS

3.1.1.1 INSTALACIÓN Y MANEJO DEL SOFTWARE SOLID WORKS ®.

Se procede a instalar el software en un computador cuyas características soporten el correcto funcionamiento de este. Se debe garantizar que el programa cuente con el complemento que se usará para la simulación aerodinámica, este es Fluid Simulation.

3.1.1.2 ENSAMBLAJE DE CHASIS

Previo a comenzar con los primeros bosquejos se requiere tener un archivo cad con el ensamblaje de chasis y un maniquí que simule la posición de conducción del piloto. En la figura 16 se observa cómo queda el chasis junto con el maniquí a usar en el estudio.

Figura 16. Ensamblaje chasis-maniquí.



Fuente: Autor



PÁGINA 45 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.1.2. CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO

Las condiciones de diseño se priorizan en los siguientes aspectos:

- Diseñar una carrocería lo más liviana posible.
- Diseñar una carrocería aerodinámica.
- Cumplir el Reglamento de la competencia Shell Eco Marathon.

3.1.2.1 REGLAS DE LA COMPETENCIA SHELL ECO MARATHON

Los siguientes enunciados son relacionados con la carrocería en los cuales tratan temas de seguridad, visibilidad, dimensiones, recomendaciones y prohibiciones, entonces:

- Durante el diseño del vehículo y la construcción los equipos deben prestar atención en todos los aspectos de seguridad (Shell Eco Marathon, 2019).
- Apéndices aerodinámicos los cuales se ajusten o cambien de forma con el viento con el vehículo en movimiento están prohibidos (Shell Eco Marathon, 2019).
- Las carrocerías no deben poseer ningún apéndice externo que resulte peligrosa para otros miembros del equipo, los puntos afilados deben tener un radio de 5cm o más, alternativamente estos pueden estar hechos de espuma o algún material deformable similar (Shell Eco Marathon, 2019).
- Los paneles de la carrocería deben tener una rigidez adecuada que no estén propensos a cambiar de forma debido al viento (Shell Eco Marathon, 2019).
- Las ventanas no deben estar fabricadas de materiales que al romperse deje fragmentos afilados se recomienda materiales de policarbonato (Shell Eco Marathon, 2019).
- Cualquier tapa del compartimiento del motor, transmisión, batería debe ser fácil de abrir para una inspección rápida (Shell Eco Marathon, 2019).
- Todos los vehículos deben de ser totalmente cubiertos, vehículos abiertos no están permitidos, vehículos que parezcan bicicletas, triciclos o silla de ruedas no son aceptados (Shell Eco Marathon, 2019).



PÁGINA 46 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.1.2.2 DIMENSIONES EN CATEGORÍA PROTOTIPO

Los requerimientos en función de las dimensiones para el vehículo en la categoría prototipo son:

- La máxima altura tiene que ser menor de 100cm (Shell Eco Marathon, 2019).
- El ancho máximo del vehículo no debe exceder los 130 cm (Shell Eco Marathon, 2019).
- El radio de la altura máxima divido para el ancho de vía debe de ser menos que 1.25 (Shell Eco Marathon, 2019).
- La distancia entre los ejes debe ser al menos 100 cm (Shell Eco Marathon, 2019).
- La distancia entre las ruedas debe ser al menos 50 cm, midiendo entre los puntos medios donde los neumáticos tocan el suelo (la huella) (Shell Eco Marathon, 2019).
- El largo total no debe exceder los 350 cm (Shell Eco Marathon, 2019).
- El peso máximo sin conductor es de 140 Kg (Shell Eco Marathon, 2019).



PÁGINA 47 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.1.3. PROPUESTAS

Es por medio de la creación de tres propuestas totalmente diferentes de carrocería que se impartió la búsqueda de la más favorable entre ellas, para la futura construcción de esta y la oportuna participación de las UTS en la Shell Eco Marathon.

3.1.3.1 PROPUESTA 1

MODELADO

Para la creación de la superficie en el software CAD se hace necesario la creación de dos croquis en dos planos diferentes. Primeramente, se crea un croquis en el plano x-z, como se muestra en la figura 17.

2000

Figura 17. Croquis de la propuesta 1 en planta.

Fuente: Autor

Acto seguido se crea el croquis que estará en el plano perpendicular al anterior y es el x-z, en donde por medio de la herramienta de croquis 3D se facilita su creación y su respectiva acotación, esto se puede observar en la figura 18.



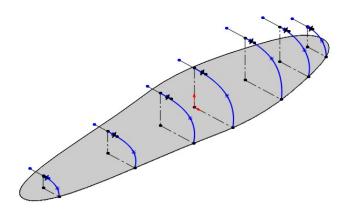
PÁGINA 48 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

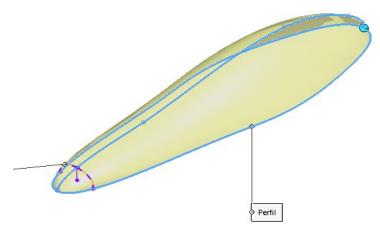
Figura 18. Croquis de la propuesta 1 en alzado



Fuente: Autor

La operación recubrir permite crear una superficie a partir de los perfiles anteriormente creados como se pude evidenciar en la figura 19.

Figura 19. Operación recubrir para modelo 1.



Fuente: Autor



PÁGINA 49 DE 132

R-DC-95

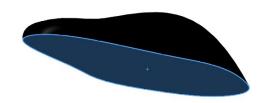
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Por medio de la operación de vaciado se vuelve el sólido creado hasta en una carcasa con un grosor de 2 mm, importante para los posteriores análisis. En la figura 20 se puede ver un pantallazo de la operación vaciado.

Figura 20. Operación de vaciado para modelo 1

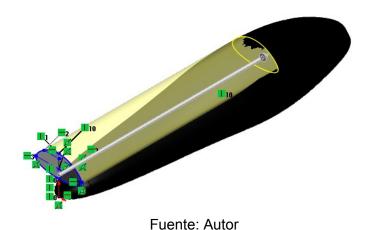




Fuente: Autor

Para la creación de la ventana principal se genera un corte al modelo mediante un croquis para corte creado en paralelo al plano alzado. Posteriormente se llena este hueco dejado por la operación corte con la operación rellenado de superficie, con esto se simula la parte de la carrocería que es transparente.

Figura 21. Operación de corte para panorámico





PÁGINA 50 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

/ x Límite de parche Cara alternativa

Figura 22. Operación de rellenado de superficie modelo 1

Fuente: Autor

Contacto - SO - Límite

ENSAMBLAJE

Optimizar superficie

Al modelo incial se añaden llantas y un eje generico para efectos de ensamblaje, el modelo final queda como se ve en la figura 23.

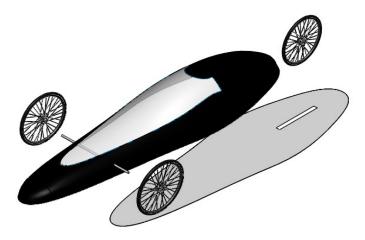


Figura 23. Vista explosionada modelo 1

Fuente: Autor

PÁGINA 51 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.1.3.2 PROPUESTA 2

MODELADO

Para la creación de la superficie en el software CAD se hace necesario la creación de dos croquis en dos planos diferentes. Primeramente, se crea un croquis en el plano x-z, como se muestra en la figura 24.

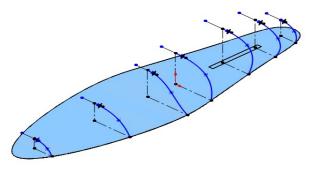
3500

Figura 24. Creación de croquis de modelo 2

Fuente: Autor

Acto seguido se crea el croquis que estará en el plano perpendicular al anterior y es el x-z, en donde por medio de la herramienta de croquis 3D se facilita su creación y su respectiva acotación, esto se hace evidente en la figura 25.

Figura 25. Creación de croquis de modelo 2



Fuente: Autor



PÁGINA 52 DE 132

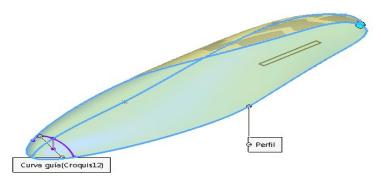
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

La operación recubrir permite crear una superficie a partir de los perfiles anteriormente creados, así como se ve en la figura 26.

Figura 26. Operación recubrir para modelo 2



Fuente: Autor

Por medio de la operación de vaciado se vuelve el sólido creado en una carcasa con un grosor de 2 mm, importante para los posteriores análisis. Se puede ver la aplicación de la operación de vaciado para esta propuesta en la figura 27.

Vaciado2

✓

Parámetros

Li 1.00mm

Cara<1> @PROTORIPO 2-1

Vista preliminar

Figura 27. Operación de vaciado en modelo 2

Fuente: Autor

A diferencia del modelo 1, en esta propuesta se quiere recubrir las llantas delanteras, luego se crea un croquis y se recubre con una superficie para lograr este objetivo.



PÁGINA 53 DE 132

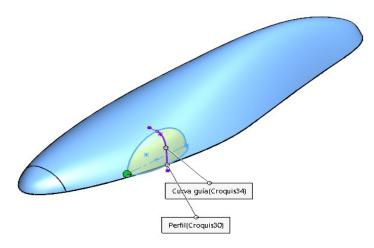
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

En la figura 28 se muestra un pantallazo de la creación de la superficie que cubre las llantas delanteras.

Figura 28. Operación recubrimiento de superficie para modelo 2



Fuente: Autor

Esta operación se repite mediante el uso de operación de simetría, para conseguir el mismo acabado en las dos llantas delanteras. Por otro lado, este prototipo cuenta con ventana laterales y delantera. Así que luego de crear un croquis para corte en un plano paralelo al plano de vista lateral, se procede a crear los huecos para las ventanas laterales, del mismo modo se opera para la creación de la ventana frontal. Este proceso se puede ver en la figura 29.

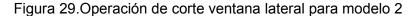


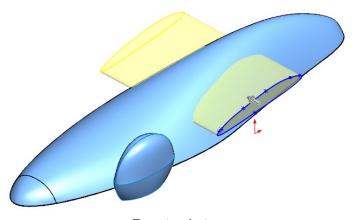
PÁGINA 54 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

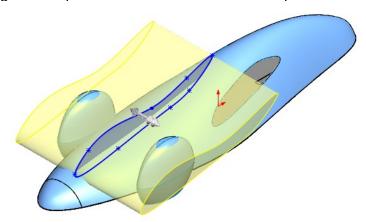




Fuente: Autor

En la figura 30 se puede ver el croquis que se usó para hacer a operación de corte a la ventana frontal de este modelo.

Figura 30. Operación de corte ventana frontal para modelo 2



Fuente: Autor

Finalmente se rellena las superficies huecas de los cortes de las ventanas con una superficie de aspecto transparente como se ve en la figura 31.



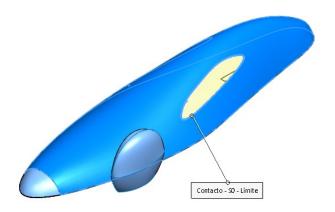
PÁGINA 55 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 31. Operación de relleno superficie hueca ventana para modelo 2

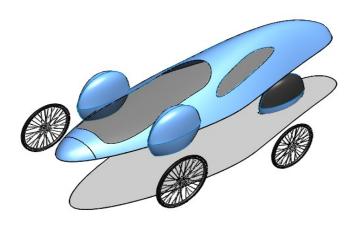


Fuente: Autor

• ENSAMBLAJE

Al modelo inicial se añaden llantas y un eje generico para efectos de ensamblaje, el modelo final queda como se puede apreciar en la figura 32.

Figura 32. Perfil de carrocería en vista superior y frontal de propuesta 2



Fuente: Autor

3.1.3.3 PROPUESTA 3

PÁGINA 56 DE 132

R-DC-95

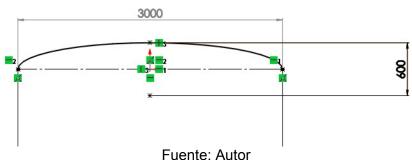
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

MODELADO

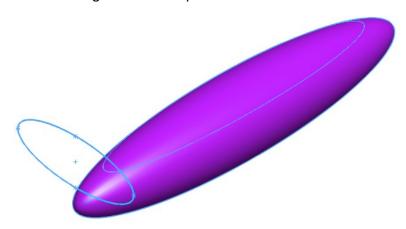
Para el modelado de la última propuesta se usa una operación principal diferente a la que se ha usado en las propuestas anteriores. Esta vez, se extruye un elipsoide, a partir de un croquis con forma de semi elipse en el plano alzado y un eje central de referencia para la operación superficie por revolución.

Figura 33. Croquis en vista superior para modelo 3.



Para la operación de corte que definirá la ventana única se genera un croquis en el plano alzado como sigue.

Figura 34. Corte para ventana modelo 3



Fuente: Autor

• ENSAMBLAJE

Al modelo incial se anaden llantas y un eje generico para efectos de ensamblaje, el modelo final queda se evidencia en la figura 35.



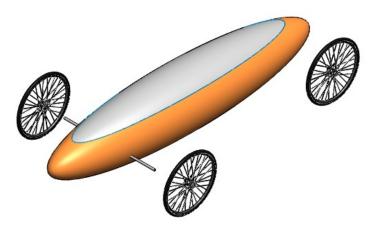
PÁGINA 57 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01





Fuente: Autor

3.2 ANALISIS ESTATICO

El análisis estático por medio del método de elementos finitos ayuda resolver de una manera más sencilla los cálculos necesarios para obtener valores de tensiones y de factor de seguridad, todo esto en relación con el material del que se pretende construir la carrocería.

En el presente apartado se realizará la simulación estática a las tres propuestas, de manera que se pueda finalmente validar el uso de la resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio como material para la futura manufactura de la carrocería del vehículo.

3.2.1 MATERIAL

Para el estudio desarrollado en el presente informe y para una futura construcción de la carrocería se usará como material primario de construcción la resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio (PRFV). Esto debido al buen historial que tiene este material en otros proyectos de participación en la Shell eco marathon.

Las fibras de vidrio, similar al trabajo que hace el acero en las vigas de concreto, dan refuerzo al poliéster para obtener características sobresalientes que hacen del poliéster reforzado uno de los principales sustitutos del acero y materiales tradicionales (Quintero Carlos, 2007).



PÁGINA 58 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

El poliéster con las fibras de vidrio, forman un material compuesto donde cada material aporta sus características y propiedades, dando en la pieza final, la suma de estas, con resultados sorprendentes.

La simulación estática que se desarrolla en el presente apartado es clave para validar la decisión de usar este material en la aplicación que se pretende.

Las características mecánicas más significativas a la hora de confrontar los resultados de la simulación estática se muestran en la tabla 1 como sigue.

Tabla 1. Características significativas de la resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio

PRFV	
Densidad (Kg/m3)	152.
	9
Módulo de elasticidad (KPa)	60
Resistencia a la tracción (KPa)	1000

Fuente: Ned Coackley, 1994

3.2.2 PROPUESTA 1

3.2.2.1 PREPROCESO

MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO

En la primera parte del Preproceso se realiza el modelo de simulación simplificado mostrado en la figura 36, mediante el cual se generó un sólido simplificado del modelo original para garantizar una mejor convergencia del cálculo y evitar errores en el mallado.



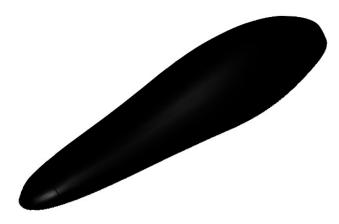
PÁGINA 59 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01





Fuente: Autor

EDICIÓN/APLICACIÓN DEL MATERIAL

En vista de que para la construcción del vehículo se dispone de plástico reforzado con fibra de vidrio se procede a la etapa de edición y aplicación del material mediante la cual se considera PRFV como material principal para la composición de la carrocería.

Adicionalmente se introducen algunos valores no predeterminados por el software y que son de vital importancia para el normal desarrollo del análisis, esto último se puede evidenciar en el pantallazo del programa que se muestra en la figura 37.

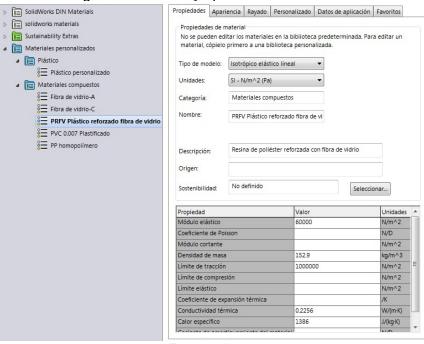
PÁGINA 60 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

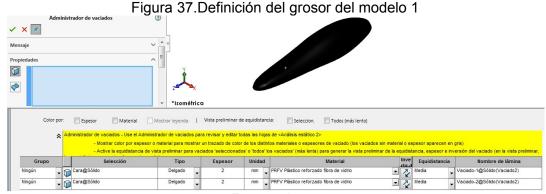
Figura 37. Edición y aplicación del material.



Fuente: Autor

DEFINICIÓN DEL GROSOR

Por medio de la herramienta Administrador de vaciados, debido a que la estructura es una carcasa, se logra definir el grosor que es de 2 mm, valor que se considera prudente para efectos de cálculos estáticos, detallado en la Figura 38.



Fuente: Autor

PÁGINA 61 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

SUJECIONES

Para efectos de esta simulación se usa como geometría fija una tapa inferior en la carrocería. (Figura 38)

Figura 38. Geometría fija de la simulación modelo 1

Sujeción

Tipo
Partir

Fjemplo

Estándar (Geometría fija)

Geometría fija

Rodillo/Control deslizante

Bisagra fija

Cara<1>@PROTORIPO 1-2

Geometría fija.

Fuente: Autor

Posteriormente se definen las condiciones de contorno, para ello se lleva acabo los siguientes procesos:

CARGA DE OPERACIÓN

Las condiciones de contorno en esta etapa se entienden como cargas externas que afectan directamente el resultado del análisis (Figura 40). Para esta simulación se tendrá en cuenta el efecto de la gravedad y una fuerza externa que represente la carga del viento sobre el vehículo como carga de operación.

Fuente: Autor

Figura 39. Aplicación de gravedad como carga externa modelo 1

ELABORADO POR: Carlos Yesid Gamboa Guerrero **REVISADO POR:**

APROBADO POR : FECHA APROBACION:



PÁGINA 62 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Si se quiere calcular la carga del viento sobre el vehículo en términos de fuerza se debe tener en cuenta las variables de proyección del área del frente de ataque y la presión del viento. Esto último se relaciona con la siguiente expresión matemática:

$$F = A \cdot P \tag{0}$$

Para el cálculo de la presión del viento en aerodinámica se emplea la fórmula:

$$P = \frac{1}{2} \cdot Cd \cdot \rho_{AireSeco} \cdot v^2 \tag{0}$$

En donde:

P: Presión del viento (N / m2)

 ρ : Densidad del aire seco = 1.223 Kg / m3 (1atm y 15°C)

v: Velocidad del viento (m/s)

Cd: Coeficiente aerodinámico de arrastre

Para este caso en particular se toma el valor del área frontal como 0.29 m2, la velocidad de viento 15 km/h o 4.16 m/s como valor promedio, y el coeficiente de arrastre calculado en el apartado 3.3.1.3.1 como 0.63.

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 10 y 11, se tiene:

$$F = \frac{0.29 \times 1}{2} \times 0.63 \times 1.223 \times 4.16^{2}$$

$$F = 1.93N$$

En la figura 40 se evidencia la aplicación de las cargas de operación sobre la carrocería.

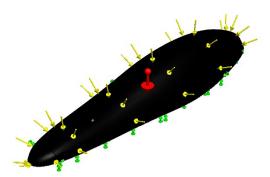
PÁGINA 63 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 40. Aplicación de carga del viento como externa modelo 1

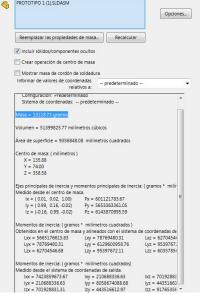


Fuente: Autor

CARGA DE DISEÑO

Para considerar el valor de la carga de diseño se calcula el valor del peso de la carrocería y se aplica como fuerza exterior a la misma.

Figura 41. Estimación del valor de masa para el modelo 1



Fuente: Autor

Como se observa en la figura 41, gracias a la herramienta propiedades físicas de Solidworks se puede obtener el valor de la masa como igual a 13.1 Kg.

$$W = m * g \tag{0}$$



PÁGINA 64 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

De donde: W es el peso de la carrocería en N m es el valor de la masa en Kg q es el valor de aceleración de la gravedad en m/s2

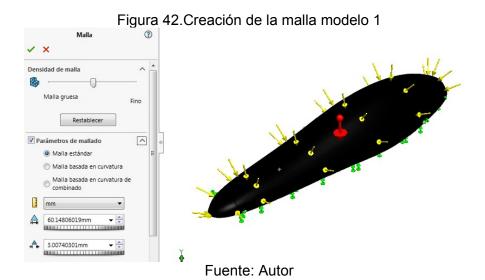
Reemplazando en la ecuación 12 se obtiene el valor del peso como fuerza.

$$W = 13.1 * 9.81$$

$$W = 128.51 \text{ N}$$

MALLADO

Una vez se definen los demás parámetros previos al análisis por último se crea la malla de elementos finitos sobre nuestro modelo de estudio. Para ello se crea la malla y definimos su densidad como se muestra a continuación.



Después de seleccionada la densidad de malla el resultado es el que se muestra en la figura 43.

Figura 43. Mallado modelo 1

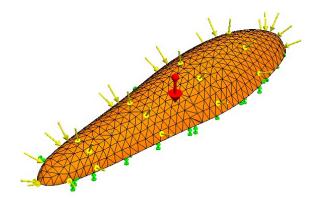


PÁGINA 65 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

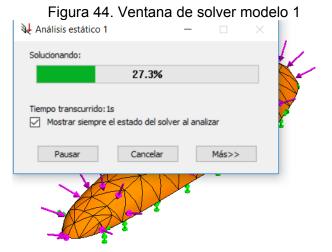


Fuente: Autor

3.2.2.2 PROCESO

SOLVER

En esta etapa del proceso el software ejecuta el análisis de elementos finitos sobre el modelo de estudio y permite visualizar mediante una ventana el avance de la ejecución.



Fuente: Autor

En la figura 44 se puede apreciar que en la ventana de solver el programa nos muestra el uso de memoria que se está usando para el cálculo, el tiempo transcurrido y el porcentaje de avance de la simulación.

3.2.3 PROPUESTA 2

PÁGINA 66 DE 132

R-DC-95

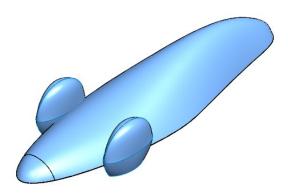
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.2.3.1 PREPROCESO

MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO

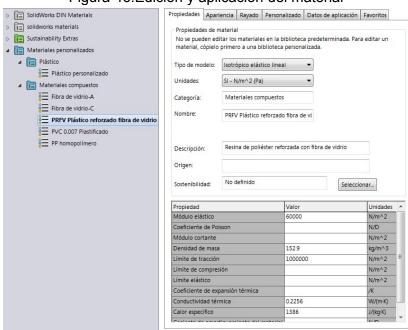
Figura 45. Modelo simplificado de modelo 2



Fuente: Autor

EDICIÓN/APLICACIÓN DEL MATERIAL

Figura 46. Edición y aplicación del material



Fuente: Autor

• DEFINICIÓN DEL GROSOR

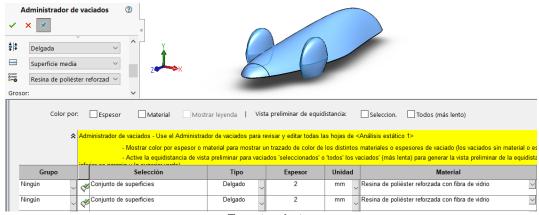
PÁGINA 67 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

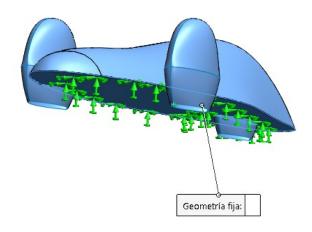
Figura 47. Definición del grosor en el administrador de vaciados modelo 2



Fuente: Autor

SUJECIONES

Figura 48. Selección de la geometría fija en modelo 2



Fuente: Autor

CARGAS DE OPERACIÓN



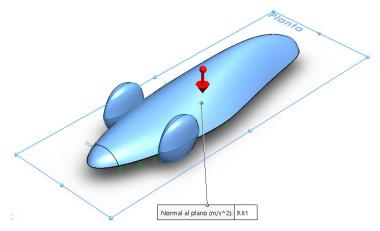
PÁGINA 68 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 49. Aplicación de condición de contorno gravedad



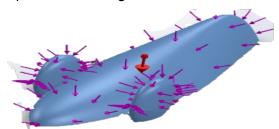
Fuente: Autor

Al momento de calcular la carga del viento sobre el vehículo, se tendrá en cuenta las expresiones matemáticas 11 y 12. Para este caso en particular se toma el valor del área frontal como 0.44 m2, la velocidad de viento 15 km/h o 4.16 m/s como valor promedio, y el coeficiente de arrastre calculado en el apartado 3.3.1.3.1 como 0.39.

$$F = \frac{0.44 \times 1}{2} \times 0.39 \times 1.223 \times 4.16^{2}$$

F = 1.81 N

Figura 50. Aplicación de carga del viento como externa modelo 2



Fuente: Autor

CARGA DE DISEÑO

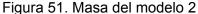


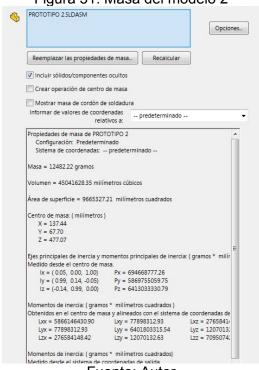
PÁGINA 69 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01





Fuente: Autor

Como se observa en la figura 51, gracias a la herramienta propiedades físicas de Solidworks se puede obtener el valor de la masa como igual a 12.4 Kg.

Y calculando el peso de esta carrocería con la ecuación 12 se tiene:

$$W = 12.4 * 9.81$$

$$W = 121.64 \text{ N}$$

MALLADO

Figura 52. Creación de malla del modelo 2

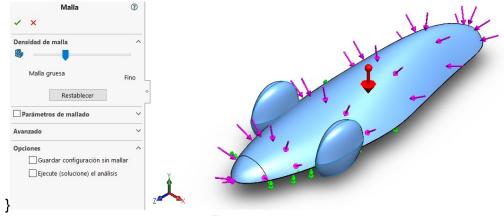


PÁGINA 70 DE 132

R-DC-95

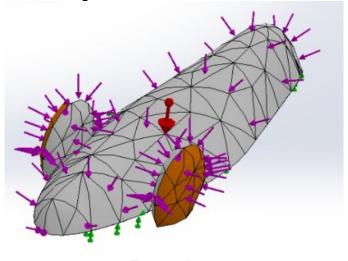
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



Fuente: Autor

Figura 53. Mallado del modelo 2



Fuente: Autor

3.2.3.2 PROCESO



PÁGINA 71 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

SOLVER

En esta etapa del proceso el software ejecuta el análisis de elementos finitos sobre el modelo de estudio y permite visualizar mediante una ventana el avance de la ejecución.

Figura 54. Cuadro de solver modelo 2

Análisis estático 1 —

Solucionando: Cargar número de paso (Grandes

82.6%

Uso de memoria: 50, 16-K

Tiempo transcurrido: 48s

Mostrar siempre el estado del solver al analizar

Pausar Cancelar Más>>

Fuente: Autor

3.2.4 PROPUESTA 3

3.2.4.1 PREPROCESO

PÁGINA 72 DE 132

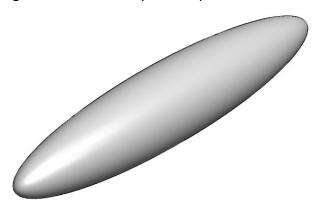
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO

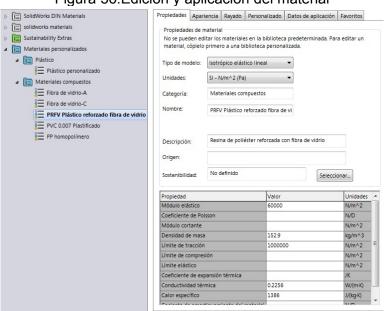
Figura 55. Modelo simplificado para simulación 3



Fuente: Autor

EDICIÓN/APLICACIÓN DEL MATERIAL

Figura 56. Edición y aplicación del material



Fuente: Autor

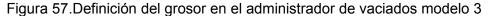
DEFINICIÓN DEL GROSOR

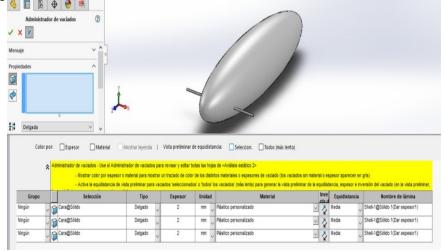
PÁGINA 73 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

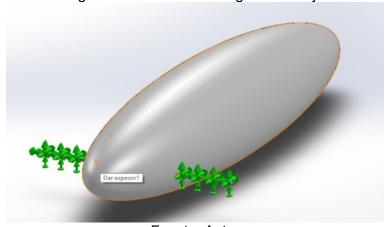




Fuente: Autor

SUJECIONES

Figura 58. Selección de la geometría fija



Fuente: Autor

CARGAS DE OPERACIÓN



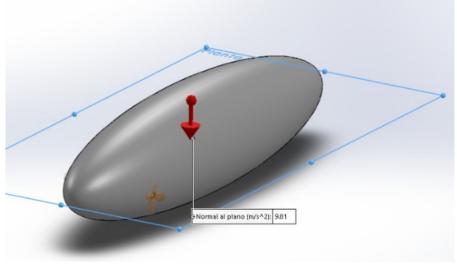
PÁGINA 74 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01





Fuente: Autor

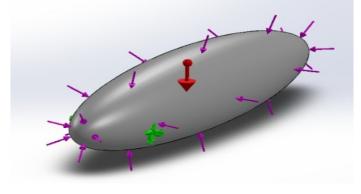
Al momento de calcular la carga del viento sobre el vehículo, se tendrá en cuenta las expresiones matemáticas 10 y 11.

Para este caso en particular se toma el valor del área frontal como 0.28 m2, la velocidad de viento 15 km/h o 4.16 m/s como valor promedio, y el coeficiente de arrastre calculado en el apartado 3.3.1.3.1 como 0.05.

$$F = \frac{0.28 \times 1}{2} \times 0.05 \times 1.223 \times 4.16^{2}$$

F = 0.15 N

Figura 60. Aplicación de carga del viento como externa modelo 3



PÁGINA 75 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

CARGA DE DISEÑO

Figura 61. Masa del modelo 3 PROTORIPO 3.SLDASM Opciones... Reemplazar las propiedades de masa... Recalcular Incluir sólidos/componentes ocultos Crear operación de centro de masa Mostrar masa de cordón de soldadura Informar de valores de coordenadas relativos a: -- predeterminado --Propiedades de masa de PROTORIPO 3 Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --Masa = 11155.48 gramos Volumen = 4295953.91 milímetros cúbicos Área de superficie = 1947396.84 milímetros cuadrados X = 0.01Y = -60.00Z = 269.11 Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * milír Medido desde el centro de masa. | Ix = (0.00, 0.00, 1.00) | Px = 2673868221.75 | Px = (1.00, 0.00, 0.00) | Px = 7188570187.68 | Px = (0.00, 1.00, 0.00) | Px = 9005682633.00 | Px = 900568263.00 | Px = 900568263.00 | Px = 9005682633.00 | Px = 900568263.00 | Px = 900568263.00 | Px = 900568263.00 Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados) Momentos de inercia: (gramos * milímetros cuadrados)
Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

Fuente: Autor

Como se observa en la figura 61, gracias a la herramienta propiedades físicas de Solidworks se puede obtener el valor de la masa como igual a 11.1 Kg.

Y calculando el peso de esta carrocería tal como se hizo en la ecuación 12 se tiene:

W = 11.1 * 9.81

W = 108.89 N

PÁGINA 76 DE 132

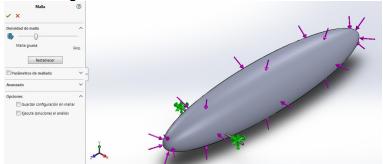
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

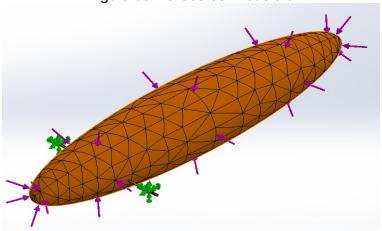
MALLADO

Figura 62.Creación de malla del modelo 3



Fuente: Autor

Figura 63.Mallado del modelo 3





PÁGINA 77 DE 132

R-DC-95

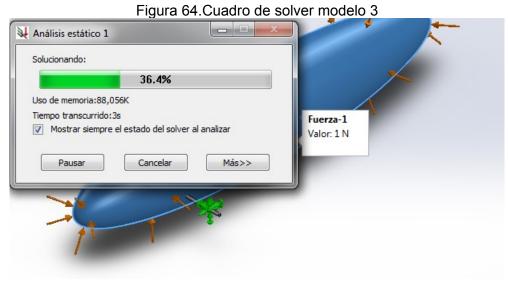
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.2.4.2 PROCESO

SOLVER

En esta etapa del proceso el software ejecuta el análisis de elementos finitos sobre el modelo de estudio y nos permite visualizar mediante una ventana el avance de la ejecución.





PÁGINA 78 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.3 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO AERODINAMICO

Una vez que se ha realizado el diseño de las diferentes propuestas para el prototipo, se hace necesario evaluar el comportamiento aerodinámico de cada una de ellas. Esto último con el principal objetivo de seleccionar definitivamente un solo modelo que ofrezca la menor resistencia al aire.

En el presente apartado se realizará el análisis aerodinámico de cada carrocería mediante la simulación CFD (Computational Fluid Dinamics) mediante el complemento Flow Simulation del software CAD usado durante todo el desarrollo del trabajo.

3.3.1 PROPUESTA 1

3.3.1.1 PREPROCESO

• MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO

Una vez se tiene el diseño propuesto listo para comenzar la simulación se debe primeramente simplificar su geometría a la de un sólido entero, toda vez que favorezca la correcta ejecución del mallado.

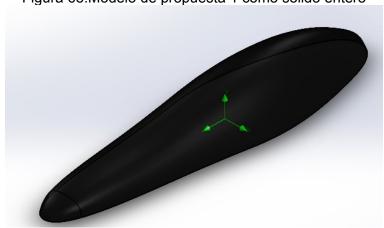


Figura 65. Modelo de propuesta 1 como solido entero



PÁGINA 79 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

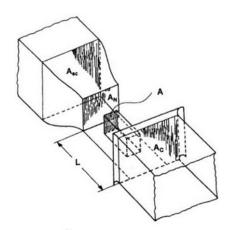
VERSIÓN: 01

DOMINIO

El dominio computacional es la región del espacio en la cual se lleva acabo el análisis, en este caso en particular se asemejan a las características de un túnel de viento. El túnel debe tener las dimensiones adecuadas de tal manera que la cantidad de flujo de aire alrededor del vehículo sea el idóneo para los resultados que se quieren conseguir.

Para estimar las dimensiones adecuadas del dominio a crear se tendrá en cuenta la relación de bloque. Esta relación tiene en cuenta el área frontal del vehículo y el área de la sección transversal del túnel. La relación de bloque (ϕ) suele de ser de ϕ =0,10 a 0,20. (Hucho & Heinrich, 2013).

Figura 66. Sección de un túnel de viento



Fuente: (Hucho & Heinrich, 2013)

La expresión que relaciona el área frontal del vehículo y el área de sección transversal del túnel de viento se define como sigue:

$$A/AN = \phi \tag{0}$$

En donde:

φ: Relación de bloque (adimensional).

A: Área frontal del vehículo (m2).

AN: Área de la sección transversal del túnel de viento. (m2).



PÁGINA 80 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Entonces, para nuestra primera propuesta se tiene un área frontal de carrocería de A=0.29~m2 y tomando $\phi=0.1$ se puede determinar el área de la sección transversal del túnel de viento AN.

AN=2.9

Este resultado quiere decir que en el rectángulo que forma el área de la sección transversal del túnel debe tener un alto y un ancho cuyo producto de 3 aproximadamente. Definimos entonces 1.5m en a y 2m en h.

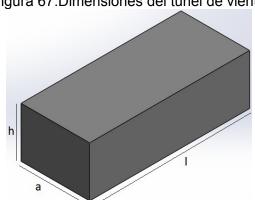


Figura 67. Dimensiones del túnel de viento

Fuente: autor

Para la longitud no existe valor referencial, únicamente la medida debe ser la suficiente como para que el flujo se desarrolle en todo el vehículo. Considerando I=6m. Esto se aplica como se aprecia en la figura 68.

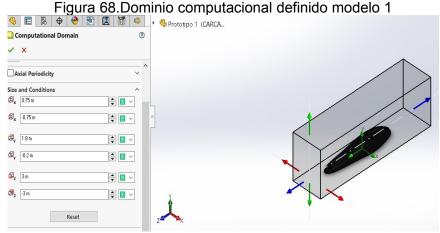


PÁGINA 81 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

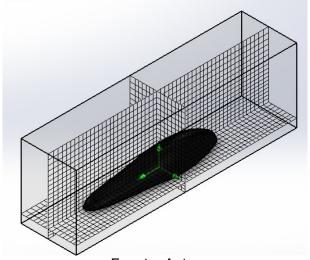


Fuente: Autor

MALLADO

Una vez se consigue definir el dominio computacional se procede a determinar el mallado, éste se discretiza o se divide en celdas para formar un mallado obteniendo un número específico de celdas refinadas. El aspecto clave será la elección adecuada del tamaño de elemento o celda, para ello se deja al software sugerir un tamaño, el que se va disminuyendo gradualmente hasta lograr una adecuada calidad de malla sin un tamaño demasiado pequeño de elemento ya que esto hará que el cálculo se prolongue demasiado tiempo.

Figura 69.Mallado con las opciones por defecto del software.



Fuente: Autor

Se puede ver que el mallado automático genera una malla de nodos uniformes lo que no permitirá el énfasis en las partes del volumen donde existan curvaturas que requieran de



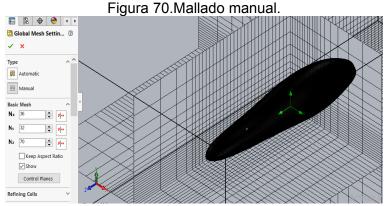
PÁGINA 82 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

un énfasis mayor que en otras partes del sólido, por ende, se procede a generar una malla de manera manual, teniendo precaución de favorecer dicha situación.

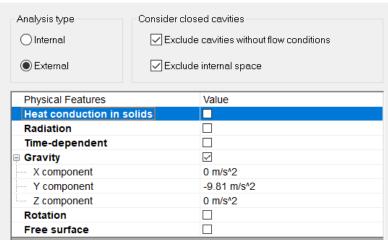


Fuente: Autor

• CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno y variables para tener en cuenta en el análisis se deben ingresar al software como datos de entrada y se definen de la manera que se puede observar a continuación.

Figura 71. Tipo de análisis



Fuente: Autor

Como se puede apreciar en la figura 71, se selecciona un análisis de tipo externo debido a que el fluido de interés circulará por la parte exterior del solido objeto de estudio, por otro lado, se selecciona la gravedad como factor para tener en cuenta dentro de la simulación.

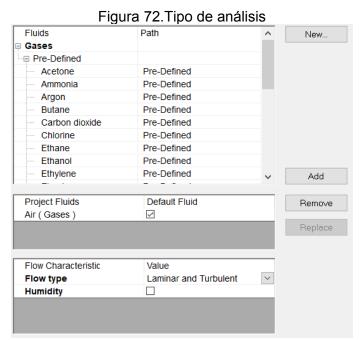


PÁGINA 83 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

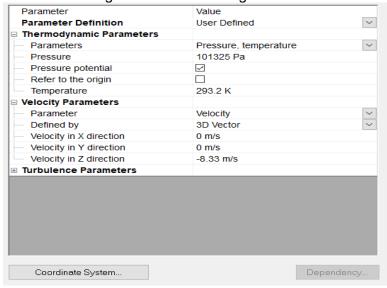
VERSIÓN: 01



Fuente: Autor

Es dentro de la lista de gases que se encuentra el aire para seleccionarlo como único fluido en la simulación, además en este mismo menú que se aprecia en la figura 72 se selecciona las características del flujo y se elige tener en cuenta ambos comportamientos tanto laminar como turbulento.

Figura 73. Parámetros generales





PÁGINA 84 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Se supone que la carrocería del vehículo se mueve por el aire en condiciones estándar, luego las propiedades del aire se definen según el modelo ISA (International Standard Atmosphere) de manera que se ingresan como se evidencia en la figura 73. También en este apartado se define el valor de la velocidad del flujo con un valor similar al de una velocidad media desarrollada por un vehículo en la categoría prototipo en esta competencia, esto es 30 km/h o 8,33 m/s.

OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN

Para finalizar con el pre-proceso previo a la puesta en marcha de la simulación CFD se deben definir qué parámetros son los de interés y en qué términos si en valores extremos y/o en valores medios. La lista de objetivos elegibles comienza en presiones, pasa por velocidades hasta llegar a fuerzas de fricción e incluso torques.

Figura 74. Objetivos globales Parameters Parameter Static Pressure **Total Pressure** Dynamic Pressure Temperature (Fluid) Total Temperature NNNNNNNNNNN Operative Temperature Draught Rate Density (Fluid) Mass (Fluid) Mass Flow Rate Velocity N N N N N N N N Velocity (X) Velocity (Y) Velocity (Z) Mach Number $\overline{\checkmark}$ Dynamic Viscosity Turbulent Viscosity Turbulent Time NNNNN Turbulence Length Turbulence Intensity Turbulent Energy NNN Turbulent Dissipation \vee Heat Transfer Coefficient Heat Flux N N N Surface Heat Flux (Convective) Wall Temperature Heat Transfer Rate Heat Transfer Rate (Convective) Total Enthalpy Rate Normal Force ablaNormal Force (Y) Normal Force (Z) Force (X) Force (Y) Force (Z) Friction Force Friction Force (X) NNN Friction Force (Y) Friction Force (Z) Shear Stress NKKKK Shear Stress (X) Shear Stress (Y) Shear Stress (Z) Torque (X) Torque (Y) Torque (Z)

PÁGINA 85 DE 132

R-DC-95

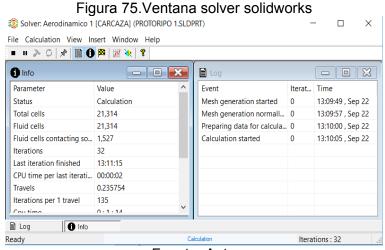
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.3.1.2 PROCESO CFD

SOLVER

Como ya se ha mencionado con anterioridad el software seleccionado para el análisis es Solidworks en su versión 2018, empleando para ello su complemento Flow Simulation. Para efectos de esta simulación se considera una velocidad promedio de 30 km/h. (8.33m/s velocidad promedio de un prototipo Shell Eco Marathon)



Fuente: Autor

Como se puede evidenciar en la figura 75 esta ventana es la que arroja el software al momento de iniciar la simulación, en ella se puede revisar los datos relacionados al tiempo de simulación y el desarrollo en tiempo real de la misma.

Solver: Aerodinamico 1 [CARCAZA] (PROTORIPO 1.SLDPRT) - [Goal plot 2] File Calculation View Insert Window Help ■ II > C | A | B O 🙉 | 📈 🤖 | 💡 Current Value Averaged Value 0.0839283 m/s GG Max Velocity (Z) 1 2.32598 m/s 2.32008 m/s Normalized Scaleffrom () to 1) 0.9 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 Iterations 0.0

Figura 76. Ventana objetivos vs. Cantidad de iteraciones en tiempo real

Fuente: Autor

₩ Goal plot 2

f Info

■ Log



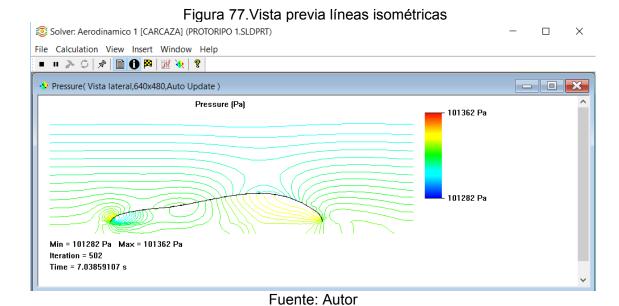
PÁGINA 86 DE 132

R-DC-95

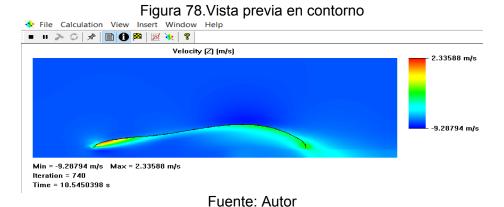
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

En la figura 76 se puede ver como el programa nos permite tener una vista previa de los resultados parciales en tiempo real, en este caso de la figura de la fuerza en el eje Z y la máxima velocidad del fluido en el mismo eje de referencia. Cuando la gráfica que describe la variación del valor del objetivo y la cantidad de iteraciones para conseguir el valor final, tiende a ser una constante, el proceso de iteración termina, y se define el valor promedio del objetivo solicitado.



Adicional al hecho de poder visualizar el desarrollo de los objetivos definidos en la etapa de preprocesamiento, también el software permite acceso a la vista previa en tiempo real de las gráficas del comportamiento del fluido con el sólido según la variable que se quiera, en el caso de la figura 77 esta es la presión. Y en el caso de la figura 78 la velocidad en el eje Z, todo esto visto en un corte lateral.





PÁGINA 87 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.3.2 PROPUESTA 2

3.3.2.1 PREPROCESO

• MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO

Como ya se había mencionado anteriormente, el modelo tiene que ser un sólido entero para no tener inconvenientes en la creación de la malla.

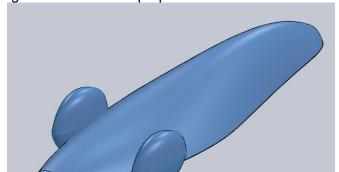


Figura 79. Modelo de propuesta 2 como solido entero

Fuente: Autor

DOMINIO

Es necesario determinar las dimensiones del túnel de viento. Entonces empleando la ecuación 13 $\varphi=\frac{A}{AN}$ se tiene:

$$A = 0.45 \text{ m2 y } \phi = 0.10$$

Despejando y reemplazando estos últimos valores se define el valor de AN.

$$AN = 4.5 \text{ m}^2$$

Ahora bien, se puede determinar las medidas del túnel, como se explicó en el apartado 3.3.1.1 Finalmente las dimensiones del túnel de viento o dominio computacional son ancho a=2.25 m, altura h=2 m y longitud l=6m.

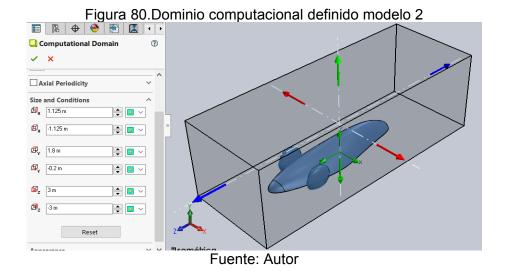


PÁGINA 88 DE 132

R-DC-95

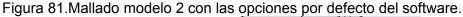
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

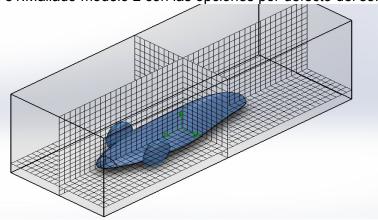
VERSIÓN: 01



MALLADO

Se deja al software sugerir un tamaño, el que se va disminuyendo gradualmente hasta lograr una adecuada calidad de malla sin un tamaño demasiado pequeño de elemento ya que esto hará que el cálculo se prolongue demasiado tiempo.





Fuente: Autor

Una vez obtenido el mallado automático se procede a mejorarlo en materia de sensibilidad mediante la opción de mallado manual.

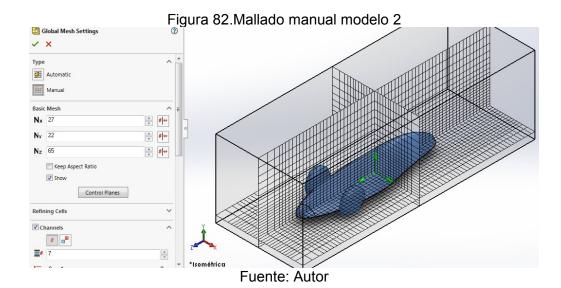


PÁGINA 89 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



CONDICIONES DE CONTORNO

Se definen como datos de entrada en el software las condiciones de contorno iguales que las establecidas en la anterior propuesta.

OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN

Para finalizar la etapa de pre-proceso seleccionamos los parámetros que queremos tener como objetivos de salida tras la simulación, tal como se hizo en la propuesta anterior.

3.3.2.2 PROCESO CFD

SOLVER

Tal como se observa en la figura 83, gracias a la herramienta Solver se puede ver el desarrollo de la simulación y el cálculo de los parámetros solicitados en tiempo real.

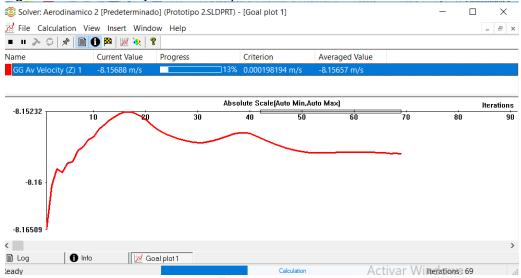
PÁGINA 90 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

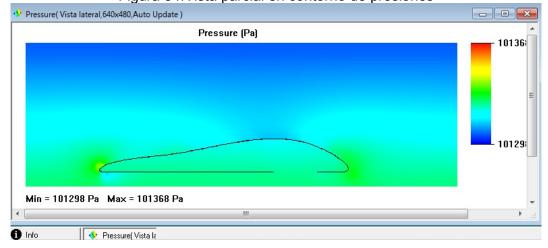
VERSIÓN: 01

Figura 83. Ventana objetivo en tiempo real vs. Cantidad de iteraciones modelo 2



Fuente: Autor

Figura 84. Vista parcial en contorno de presiones





PÁGINA 91 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.3.3 PROPUESTA 3

3.3.3.1 PREPROCESO

MODELO DE SIMULACIÓN SIMPLIFICADO

Como ya se había mencionado anteriormente, el modelo tiene que ser un sólido entero para no tener inconvenientes en la creación de la malla.

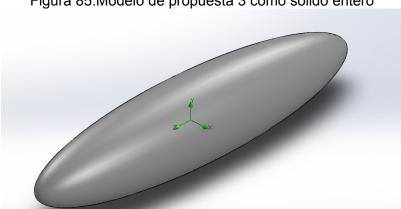


Figura 85. Modelo de propuesta 3 como solido entero

Fuente: Autor

DOMINIO

Es necesario determinar las dimensiones del túnel de viento. Entonces empleando la expresión 13 $\varphi = \frac{A}{AN}$ se tiene:

$$A = 0.26 \text{ m2 y } \phi = 0.10$$

Despejando y reemplazando estos últimos valores se define el valor de AN.

$$AN = 2.6 \text{ m}2$$

Ahora bien, se puede determinar las medidas del túnel, como se explicó en el apartado 3.3.1.1. Finalmente, las dimensiones del túnel de viento o dominio computacional son ancho a=2 m, altura h=1.2m y longitud l=4m.

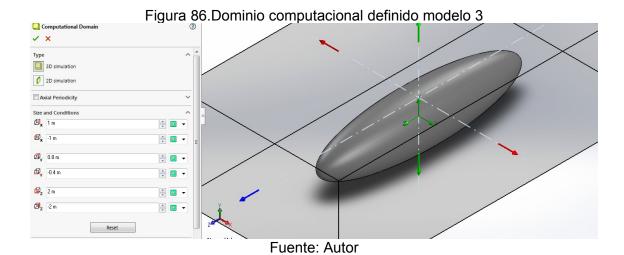


PÁGINA 92 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

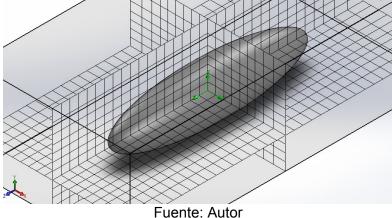
VERSIÓN: 01



MALLADO

Se deja al software sugerir un tamaño, el que se va disminuyendo gradualmente hasta lograr una adecuada calidad de malla sin un tamaño demasiado pequeño de elemento ya que esto hará que el cálculo se prolongue demasiado tiempo.





Una vez obtenido el mallado automático se procede a mejorarlo en materia de sensibilidad mediante la opción de mallado manual.

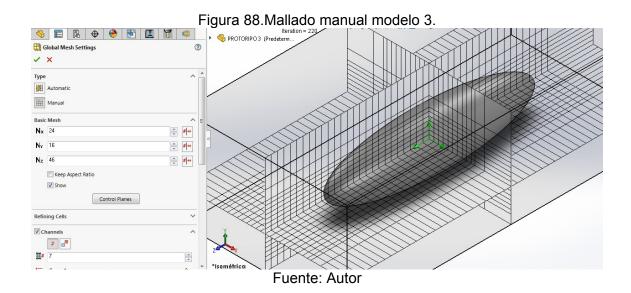


PÁGINA 93 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



CONDICIONES DE CONTORNO

Se definen como datos de entrada en el software las condiciones de contorno iguales que las establecidas en la anterior propuesta.

OBJETIVOS DE LA SIMULACIÓN

Para finalizar la etapa de pre proceso se seleccionan los parámetros que queremos tener como objetivos de salida tras la simulación, tal como se hizo en la propuesta anterior.

3.3.3.2 PROCESO CFD

SOLVER

Tal como se observa en la figura 89, gracias a la herramienta Solver se puede ver el desarrollo de la simulación y el cálculo de los parámetros solicitados en tiempo real.

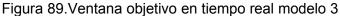


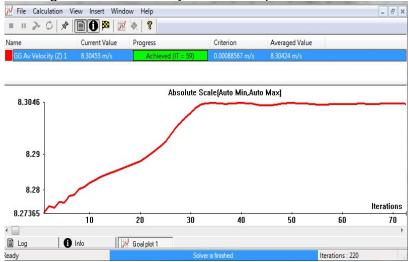
PÁGINA 94 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

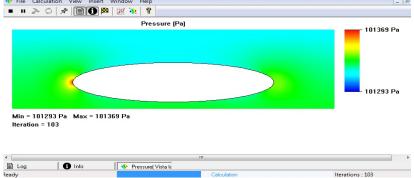
VERSIÓN: 01





Fuente: Autor

Figura 90. Vista parcial en contorno de presiones





PÁGINA 95 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

En la tabla 2 se plasma un resumen de los valores finales obtenidos para cada propuesta de coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación, presión máxima ejercida sobre el vehículo, velocidad mínima y máxima del flujo de aire sobre la carrocería.

Tabla 2. Resultados en resumen de las tres propuestas

Carrocería	Coeficiente de arrastre Cd	Coeficie nte de sustenta ción Cl	Fuerza de arrastre aerodinámico (N)	Presión máxima ejercida sobre el vehículo (Pa)	Velocidad mínima del flujo de aire (m/s)	Velocidad máxima del flujo de aire (m/s)
Propuesta 1	0.63	0.21	8.63	41	3.42	9.93
Propuesta 2	0.39	0.20	7.22	72	3.18	9.91
Propuesta 3	0.31	0.23	3.78	49	5.75	8.63

PÁGINA 96 DE 132

R-DC-95

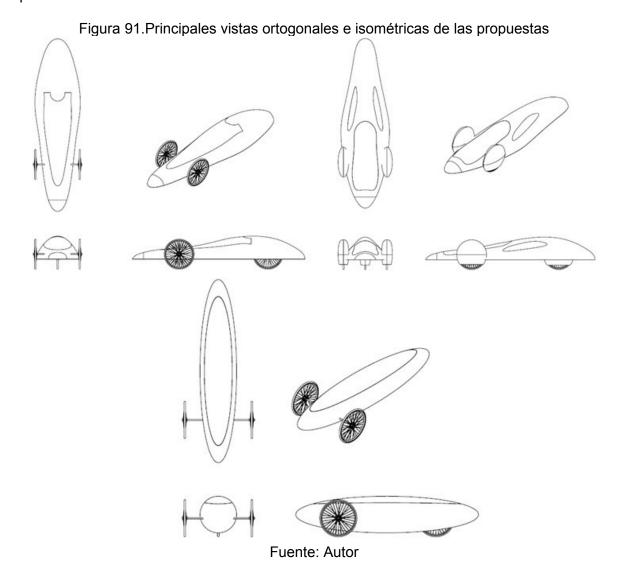
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

3.4 DEFINICIÓN Y DIBUJO DE LOS PLANOS TÉCNICOS

3.4.1 PLANOS TECNICOS

Haciendo uso de la herramienta de dibujo, se puede realizar los planos del modelo seleccionado, a continuación, se muestra una vista previa de este proceso, sin embargo, el archivo donde se puede detallar la información del plano se entrega junto con esta plantilla de informe final a manera de anexo.



PÁGINA 97 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS POR ETAPAS

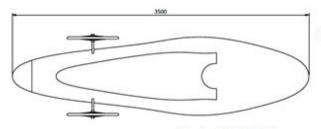
En el presente apartado se relaciona los resultados de los productos de cada análisis realizado a lo largo del proyecto de investigación.

4.1.1 MODELADO Y ENSAMBLAJE

4.1.1.1 PROPUESTA 1

La primera propuesta es una carrocería con los neumáticos delanteros visibles y un área frontal muy reducida en la figura 92 se observa la vista superior donde se hace evidente un perfil 2D aerodinámico.

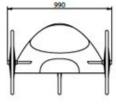
Figura 92. Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 1



Escala 1:20. Unidades mm

Fuente: Autor

Figura 93. Perfil de carrocería en vista frontal de propuesta 1



Escala 1:20. Unidades:mm

Fuente: Autor

Su largo total es de 3500 mm y su sección más ancha es de 990 mm incluyendo las llantas.

En cuanto al perfil lateral de la carrocería podemos observar que la altura máxima de esta propuesta es 468 mm.



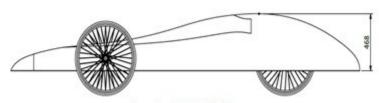
PÁGINA 98 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 94. Perfil de carrocería en lateral de propuesta 1



Escala 1:20. Unidades: mm

Fuente: Autor

En la figura 95 se puede apreciar una vista isométrica de este primer modelo.

Figura 95. Vista isométrica carrocería de propuesta 1



PÁGINA 99 DE 132

R-DC-95

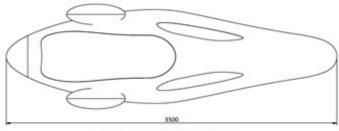
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

4.1.1.2 PROPUESTA 2

Para la segunda propuesta se propone diseñar una carrocería con un área reducida tanto al frente como en su parte posterior, además de que cubra completamente las llantas. Con respecto a la altura y el largo del vehículo se conservan medidas muy similares a la propuesta 1, es en el ancho de la carrocería en donde se evidencia una diferencia de más de 10 cm.

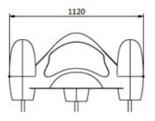
Figura 96. Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 2



Escala 1:20. Unidades: mm

Fuente: Autor

Figura 97. Perfil de carrocería en vista frontal de propuesta 2



Escala 1:20. Unidades: mm

Fuente: Autor

En la figura 98 observamos el perfil lateral que es muy similar en altura con respecto a la primera propuesta, con tan solo 2 mm de diferencia.

Figura 98. Perfil de carrocería en vista lateral de propuesta 2





PÁGINA 100 DE 132

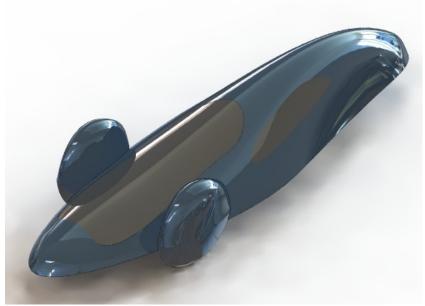
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

El resultado final de este modelo se muestra en la figura 99.

Figura 99. Modelo final de propuesta 2



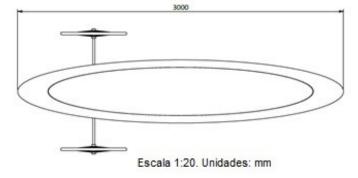
Fuente: Autor

4.1.1.3 PROPUESTA 3

Para la tercera propuesta se diseña una carrocería con perfiles regulares tal como lo es el elipsoide.

En la figura 100 se puede apreciar que las medidas de este modelo son reducidas en cuanto a largo y elevadas en lo que respecta a altura como se ve en la figura contigua.

Figura 100. Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 3





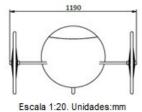
PÁGINA 101 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

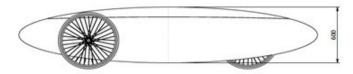
Figura 101. Perfil de carrocería en vista frontal de propuesta 3



Fuente: Autor

En el perfil lateral se hace evidente la ganancia de altura en este modelo geométrico.

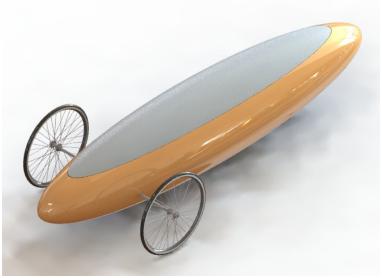
Figura 102. Perfil de carrocería en vista lateral de propuesta 3



Escala 1:20. Unidades mm

Y el resultado final de este modelo se puede ver en la figura 103.

Figura 103. Modelo final de propuesta 3



PÁGINA 102 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

4.1.1.4 SELECCIÓN PARCIAL

En esta temprana etapa del estudio se logró definir a grandes rasgos cual será la apariencia principal de la carrocería objeto de estudio, según esto, los factores determinantes para seleccionar una propuesta hasta ese momento serán la estética resultante en las diferentes propuestas y el diseño autentico de las mismas.

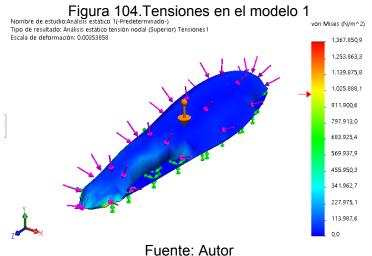
Basado en estos primeros criterios se opta por elegir la carrocería de la propuesta 2, sin ser esto una elección significativa como la que puede arrojar los resultados de los análisis posteriores.

4.1.2 ANALISIS ESTATICO

4.1.2.1 POSTPROCESO 1

El objetivo principal de este análisis estático es definir el factor de seguridad del modelo con la finalidad de validar el uso de la fibra de vidrio para la construcción de este.

RESULTADOS DE TENSIONES DE VONMISES



r dente. Adtor

De los resultados arrojados por el programa se puede inferir que los valores de tensión en N/m2 son 13987.6 en sus puntos más bajos y 34196.7 en sus puntos más críticos, aun así son valores muy inferiores al límite elástico del material cuyo valor es 3.1 Mega N/m2 por lo que se puede inferir fácilmente que el valor del factor de seguridad será elevado.

PÁGINA 103 DE 132

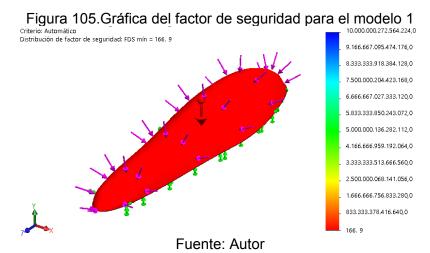
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad relaciona el límite elástico del material con el esfuerzo máximo de Vonmises. El valor de este esfuerzo depende directamente de la magnitud de las fuerzas aplicadas al objeto de análisis, que en este caso es muy reducido en comparación con el valor del límite elástico de la resina reforzada con fibra de vidrio.

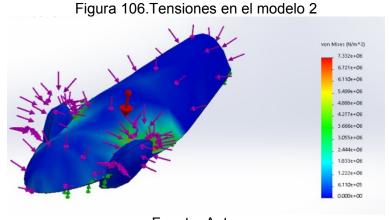


Bajo estos resultados podemos concluir que el diseño de la carrocería está en capacidad de soportar hasta 166 veces más el valor de las cargas de diseño y operación.

4.1.2.2 POSTPROCESO 2

El objetivo principal de este análisis estático es definir el factor de seguridad del modelo con la finalidad de validar el uso de la fibra de vidrio para la construcción de este.

RESULTADOS DE TENSIONES DE VONMISES





PÁGINA 104 DE 132

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

De los resultados arrojados por el programa se puede inferir que los valores de tensión en N/m2 son 6110.06 en sus puntos más bajos y 1833.06 en sus puntos más críticos, aun así son valores muy inferiores al límite elástico del material cuyo valor es 3.1 Mega N/m2 por lo que se puede inferir fácilmente que el valor del factor de seguridad será elevado.

RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad relaciona el límite elástico del material con el esfuerzo máximo de Vonmises. El valor de este esfuerzo depende directamente de la magnitud de las fuerzas aplicadas al objeto de análisis, que en este caso es muy reducido en comparación con el valor del límite elástico de la resina reforzada con fibra de vidrio.

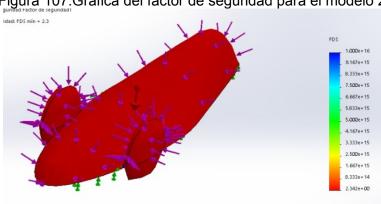


Figura 107. Gráfica del factor de seguridad para el modelo 2

Fuente: Autor

Bajo estos resultados podemos concluir que el diseño de la carrocería está en capacidad de soportar hasta 123 veces más las cargas de diseño y operación aplicadas. (Figura 107)

PÁGINA 105 DE 132

R-DC-95

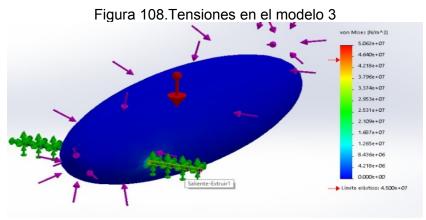
INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

4.1.2.3 POSTPROCESO 3

El objetivo principal de este análisis estático es definir el factor de seguridad del modelo con la finalidad de validar el uso de la fibra de vidrio para la construcción de este.

• RESULTADOS DE TENSIONES DE VONMISES

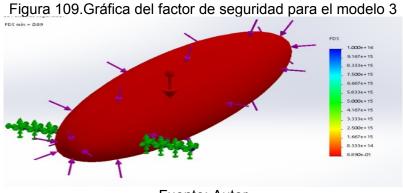


Fuente: Autor

De los resultados arrojados por el programa se puede inferir que los valores de tensión en N/m2 son 4298.06 en sus puntos más bajos y 8436.06 en sus puntos más críticos, aun así son valores muy inferiores al límite elástico del material cuyo valor es 3.1 Mega N/m2 por lo que se puede inferir fácilmente que el valor del factor de seguridad será elevado.

• RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad relaciona el límite elástico del material con el esfuerzo máximo de Vonmises. El valor de este esfuerzo depende directamente de la magnitud de las fuerzas aplicadas al objeto de análisis, que en este caso es muy reducido en comparación con el valor del límite elástico de la fibra de vidrio.



PÁGINA 106 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Bajo estos resultados podemos concluir que el diseño de la carrocería está en capacidad de soportar hasta 580 veces más las cargas de diseño y operación aplicadas (Figura 109).

4.1.2.4 SELECCIÓN PARCIAL

Tabla 3. Resultados de análisis estático de las tres propuestas

Ítem	Tensión máxima (N/m2)	Factor de seguridad
Propuesta 1	34196.7	166
Propuesta 2	11833.06	123
Propuesta 3	8436.06	580

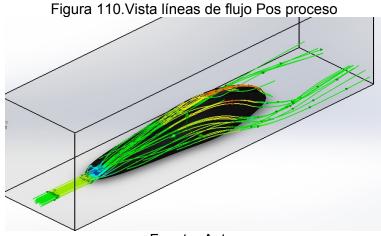
Fuente: Autor

Según los resultados obtenidos por el análisis mediante el método de elementos finitos, se puede concluir que el modelo más favorecido en términos del factor de seguridad es el presentado en la propuesta 3 debido a que el valor del factor de seguridad es superior con respecto a las otras dos propuestas, esto da confianza para pensar en una futura construcción real del prototipo.

4.1.3 SIMULACION AERODINAMICA

4.1.3.1 POSTPROCESO 1

El objetivo principal de este análisis fue obtener los datos correspondientes al coeficiente de arrastre (Cd), el coeficiente de sustentación (Cl), la presión que ejerce el viento sobre el vehículo y la velocidad del flujo de aire sobre la carrocería.





PÁGINA 107 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

En este apartado se procederá a realizar el cálculo de los coeficientes nombrados anteriormente basándose en los datos de fuerza arrojados automáticamente por el software, por otro lado, se enseñarán los resultados para los parámetros de presión y velocidad.

COEFICIENTE DE ARRASTRE CD

El coeficiente de arrastre Cd se calculará a partir del dato arrojado por el programa de la fuerza ejercida por el fluido en el eje de coordenadas Z, es decir el que recorre su longitud máxima.

Figura 111.Tabla de resultados								
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value				
GG Av Density (Fluid) 1	1.2037 kg/m^3	Achieved (IT = 75)	6.96762e-08 kg/m^3	1.2037 kg/m^3				
GG Av Dynamic Pressure 1	41.0614 Pa	Achieved (IT = 75)	0.0144637 Pa	41.0614 Pa				
GG Av Dynamic Viscosity 1	1.81464e-05 Pa*s	Achieved (IT = 73)	6.67161e-13 Pa*s	1.81464e-05 Pa*s				
GG Av Static Pressure 1	101325 Pa	Achieved (IT = 74)	0.00365897 Pa	101325 Pa				
GG Av Total Pressure 1	101366 Pa	Achieved (IT = 75)	0.0157476 Pa	101366 Pa				
GG Av Turbulent Time 1	2.6883 s	Achieved (IT = 71)	0.0120654 s	2.68838 s				
GG Av Turbulent Viscosity 1	0.000139873 Pa*s	Achieved (IT = 116)	3.14447e-06 Pa*s	0.00013962 Pa*s				
GG Av Velocity (X) 1	0.000498141 m/s	Achieved (IT = 179)	8.69438e-05 m/s	0.000508158 m/s				
GG Av Velocity (Y) 1	-0.110718 m/s	Achieved (IT = 58)	0.00339225 m/s	-0.11082 m/s				
GG Av Velocity (Z) 1	-8.20727 m/s	Achieved (IT = 72)	0.00248466 m/s	-8.20723 m/s				
GG Av Velocity 1	8.24739 m/s	Achieved (IT = 75)	0.00174912 m/s	8.24733 m/s				
GG Force (X) 1	-0.0329575 N	Achieved (IT = 64)	0.0450514 N	-0.0357351 N				
GG Force (Y) 1	20.9497 N	Achieved (IT = 64)	0.559954 N	20.9546 N				
GG Force (Z) 1	-8.64522 N	Achieved (IT = 53)	0.491751 N	-8.63825 N				
GG Force 1	22.6634 N	Achieved (IT = 66)	0.44159 N	22.6653 N				

Fuente: Autor

De acuerdo con los datos obtenidos que se evidencian en la figura 111 el valor de la fuerza de arrastre en Z es 8.64N en la dirección negativa del eje de referencia. Por lo tanto y calculando el valor del área frontal del croquis del modelo se puede calcular Cd con el modelo matemático que se muestra a continuación.

$$Cd = \frac{Fz}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot Ax} \tag{0}$$

En donde:

Fz= Fuerza de arrastre en el eje Z [N]

p= Densidad del aire en condiciones estándar [Kg/m3]

V= Velocidad del aire [m/s]

Ax= Área transversal a la dirección del flujo [m2]



PÁGINA 108 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Reemplazando los valores del caso en le ecuación 14, se tendrá que:

$$Cd = \frac{8.64}{\frac{1}{2}.1.204.(8.33)^2.0.32}$$

Cd = 0.63

• COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN CL

De acuerdo con los datos obtenidos que se evidencian en la figura 94 el valor de la fuerza de la carga aerodinámica de sustentación en Y es 20.9 N. Por lo tanto y calculando el valor del área en planta del croquis del modelo se puede calcular CI con el modelo matemático que se muestra a continuación.

$$Cl = \frac{Fy}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot Ay} \tag{0}$$

En donde:

Fy= Carga aerodinámica de sustentación en el eje Y [N]

ρ= Densidad del aire en condiciones estándar [Kg/m3]

V= Velocidad del aire [m/s]

Ay= Área transversal del cuerpo en sentido perpendicular al flujo [m2]

Reemplazando los valores del caso en la ecuación 15, se tendrá que:

$$Cl = \frac{20.9}{\frac{1}{2}.1.225.(8.33)^2.2.31}$$

$$Cl = 0.21$$

PÁGINA 109 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

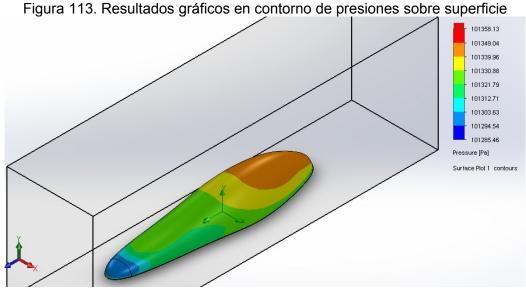
RESULTADOS DE PRESIÓN

El resultado de la presión máxima ejercida sobre el modelo es de 41 Pa. A continuación, se muestran graficas de la carrocería del vehículo en donde se evidencia los diferentes valores de presión a los que está sometido este modelo.

101358.88 101350.72 101342.56 101334.40 101326.25 101318.09 101309.93 101301.78 101293.62 101285.46 Pressure [Pa]

Figura 112. Resultados gráficos en contorno de presiones

Fuente: Autor



Fuente: Autor

RESULTADOS DE VELOCIDAD

PÁGINA 110 DE 132

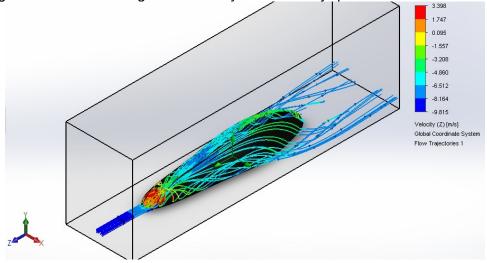
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

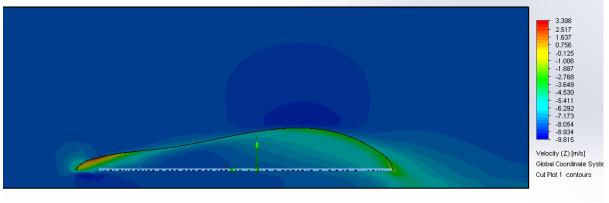
El resultado de la velocidad máxima de flujo de aire en el vehículo es de 9.93 m/s y la mínima es de -3.42 m/s. A continuación, se muestran graficas de la carrocería del vehículo en donde se evidencia las diferentes variaciones de velocidad a lo largo de la misma.

Figura 114. Resultados gráficos de trayectoria de flujo para valores de velocidad



Fuente: Autor

Figura 115. Resultados gráficos en contorno de valores de velocidad



Fuente: Autor

RESULTADOS GLOBALES



PÁGINA 111 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

El objetivo de este análisis es principalmente obtener los datos correspondientes a: el coeficiente de arrastre (Cd), el coeficiente de sustentación (Cl), la presión que ejerce el viento sobre el vehículo y la velocidad del flujo de aire sobre la carrocería. Entonces sabiendo que la velocidad de análisis es 30km/h(8.33m/s) se tiene:

Tabla 3. Resultados de simulación aerodinámica propuesta 1

Carrocería	Coeficiente de arrastre Cd	Coeficiente de sustentació n Cl	Fuerza de arrastre aerodinámico (N)	Presión máxima ejercida sobre el vehículo (Pa)	Velocidad mínima del flujo de aire (m/s)	Velocidad máxima del flujo de aire (m/s)
Propuesta 1	0.63	0.21	8.63	41	3.42	9.93

Fuente: Autor

4.1.3.2 POSTPROCESO 2



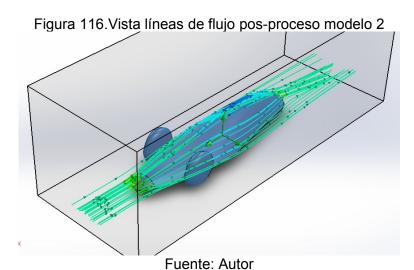
PÁGINA 112 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Una vez terminada la operación de simulación se procede a realizar los cálculos de los coeficientes de arrastre y de sustentación. Además, se determinará el valor de presión y velocidades máxima y mínima.



• COEFICIENTE DE ARRASTRE CD

El coeficiente de arrastre Cd se calculará a partir del dato arrojado por el programa de la fuerza ejercida por el fluido en el eje de coordenadas Z.



Fuente: Autor

De acuerdo con los datos obtenidos que se evidencian en la figura 117 el valor de la fuerza de arrastre en Z es 7.22N.

Reemplazando los valores en la ecuación matemática 14, se tendrá que:



PÁGINA 113 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

$$Cd = \frac{7.22}{\frac{1}{2}.1.204.(8.33)^2.0.44}$$

$$Cd = 0.39$$

COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN CL

De acuerdo con los datos obtenidos que se evidencian en la figura 117 el valor de la fuerza de la carga aerodinámica de sustentación en Y es 20.9 N. Por lo tanto y calculando el valor del área en planta del croquis del modelo se puede calcular Cl con el modelo matemático 15.

Reemplazando los valores del caso, se tendrá que:

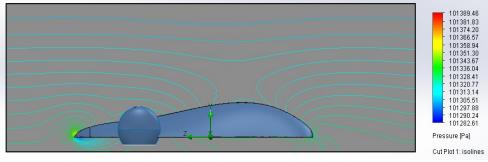
$$Cl = \frac{19.92}{\frac{1}{2}.1.225.(8.33)^2.2.31}$$

$$Cl = 0.20$$

RESULTADOS DE PRESIÓN

El resultado de la presión máxima ejercida sobre el modelo es de 72 Pa.

Figura 118. Resultados gráficos en lineas isobaricas de modelo 2



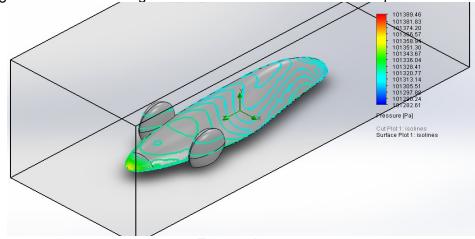
PÁGINA 114 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



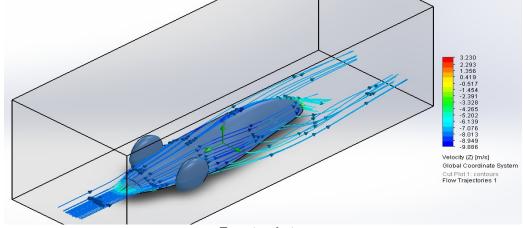


Fuente: Autor

• RESULTADOS DE VELOCIDAD

El resultado de la velocidad máxima de flujo de aire en el vehículo es de 9.91 m/s y la mínima es de -3.18 m/s.

Figura 120. Resultados gráficos de trayectoria de flujo para valores de velocidad modelo 2





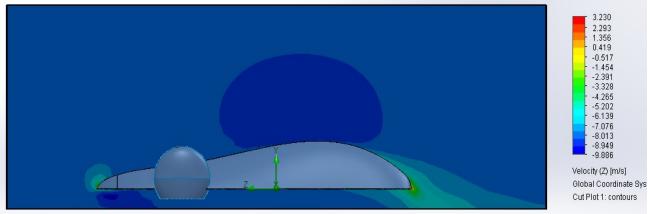
PÁGINA 115 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 121. Resultados gráficos en contorno de valores de velocidad modelo 2



Fuente: Autor

• RESULTADOS GLOBALES

Sabiendo que la velocidad de análisis es 30km/h(8.33m/s) se tiene:

Tabla 4. Resultados de simulación aerodinámica propuesta 2

Car	rocería	Coeficient e de arrastre Cd	Coeficiente de sustentación Cl	Fuerza de arrastre aerodinámico (N)	Presión máxima ejercida sobre el vehículo (Pa)	Velocidad mínima del flujo de aire (m/s)	Velocidad máxima del flujo de aire (m/s)
Pro	puesta 2	0.39	0.20	7.22	72	3.18	9.91

PÁGINA 116 DE 132

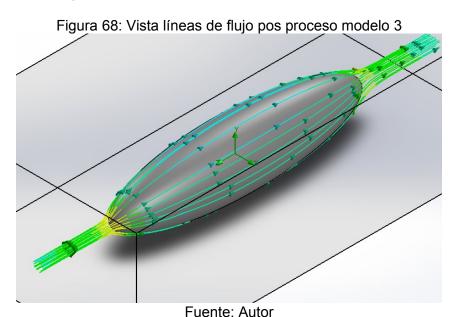
R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

4.1.3.3 POSTPROCESO 3

Una vez terminada la operación de simulación se procede a realizar los cálculos de los coeficientes de arrastre y de sustentación. Además, se determinará el valor de presión y velocidades máxima y mínima.



COEFICIENTE DE ARRASTRE CD

El coeficiente de arrastre Cd se calculará a partir del dato arrojado por el programa de la fuerza ejercida por el fluido en el eje de coordenadas Z.

Figura 122. Tabla de resultados modelo 3 Solver: Project(1) [Predeterminado] (PROTORIPO 3 (1).SLDPRT) - [List of Goals] 🎮 File Calculation View Insert Window Help Name Current Value Criterion Averaged Value GG Av Static Pressure 1 101325 Pa 0.147093 Pa 101325 Pa GG Av Total Pressure 1 101550 Pa 0.604589 Pa 101550 Pa GG Av Velocity (X) 1 -0.000913959 m/s 0.000196243 -0.000914622 m/s GG Av Velocity (Y) 1 0.000229003 m/s 0.000179485 0.000185433 m/s GG Av Velocity (Z) 1 -19.2695 m/s 0.0275218 m, -19.2695 m/s GG Av Velocity 1 19.2911 m/s 0.0274211 m, 19.2911 m/s GG Force (X) 1 0.150574 N 0.100565 N 0.149568 N GG Force (Y) 1 6.38472 N 0.0363107 N 6.39563 N GG Force (Z) 2 -3.78003 N 0.596006 N -3.76551 N GG Force 1 7.42132 N 0.391522 N 7.42332 N GG Friction Force 1 1.61582 N 0.218951 N 1.61579 N GG Max Static Pressure 1 101425 Pa 5.666 Pa 101425 Pa 101577 Pa 101577 Pa GG Max Total Pressure 1 1.43576 Pa GG Max Velocity (X) 1 5.52424 m/s 0.159968 m/: 5.52862 m/s

PÁGINA 117 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

De acuerdo con los datos obtenidos que se evidencian en la figura 122 el valor de la fuerza de arrastre en Z es 3.69 N.

Reemplazando los valores en la expresión matemática 14, se tendrá que:

$$Cd = \frac{3.78}{\frac{1}{2}.1.225.(8.33)^2.0.28}$$

$$Cd = 0.31$$

• COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN CL

De acuerdo con los datos obtenidos que se evidencian en la figura 122 el valor de la fuerza de la carga aerodinámica de sustentación en Y es 20.9 N.

Reemplazando los valores del caso en la ecuación 15, se tendrá que:

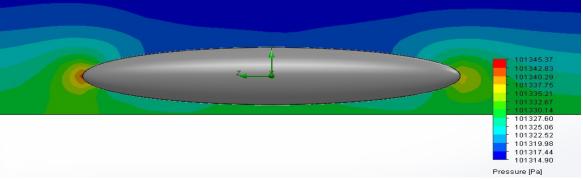
$$Cl = \frac{6.39}{\frac{1}{2}.1.225.(8.33)^2.0.71}$$

$$Cl = 0.23$$

RESULTADOS DE PRESIÓN

El resultado de la presión máxima ejercida sobre el modelo es de 101372 Pa.

Figura 123.Resultados gráficos en contorno de presiones modelo 3



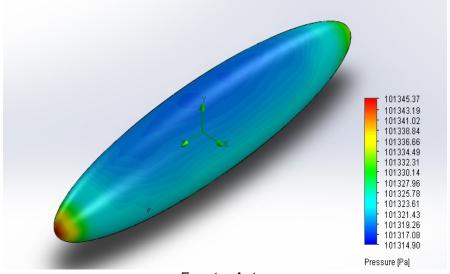
PÁGINA 118 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 124. Resultados gráficos en contorno sobre superficie modelo 3

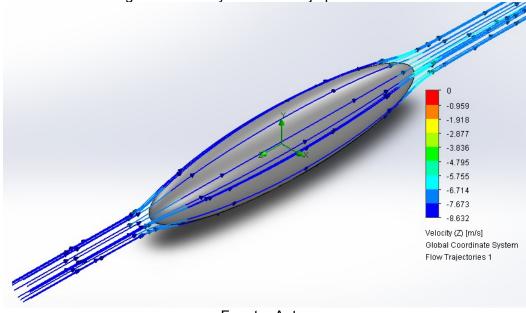


Fuente: Autor

• RESULTADOS DE VELOCIDAD

El resultado de la velocidad máxima de flujo de aire en el vehículo es de 8.63 m/s y la mínima es de 0 m/s.

Figura 125. Resultados gráficos de trayectoria de flujo para valores de velocidad modelo 3





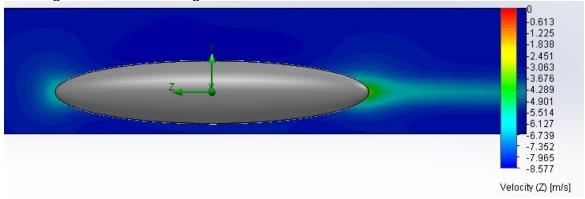
PÁGINA 119 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Figura 126.Resultados gráficos en contorno de valores de velocidad modelo 2



Fuente: Autor

RESULTADOS GLOBALES

Sabiendo que la velocidad de análisis es 30km/h (8.33m/s) se tiene:

Tabla 5. Resultados de simulación aerodinámica propuesta 3.

Carrocería	Coefici ente de arrastre	Coeficiente de sustentación Cl	Fuerza de arrastre aerodinámic o (N)	Presión máxima ejercida sobre el vehículo (Pa)	Velocidad mínima del flujo de aire (m/s)	Velocidad máxima del flujo de aire (m/s)
Propuesta 3	0.31	0.23	3.78	49	2.1	8.63

Fuente: Autor

4.1.3.4 SELECCIÓN PARCIAL



PÁGINA 120 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

En la tabla 6 se plasma un resumen de los valores finales obtenidos para cada propuesta de coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación, presión máxima ejercida sobre el vehículo, velocidad mínima y máxima del flujo de aire sobre la carrocería.

Tabla 6. Resultados en resumen de las tres propuestas

Carrocería	Coeficiente de arrastre Cd	Coeficie nte de sustenta ción Cl	Fuerza de arrastre aerodinámico (N)	Presión máxima ejercida sobre el vehículo (Pa)	Velocidad mínima del flujo de aire (m/s)	Velocidad máxima del flujo de aire (m/s)
Propuesta 1	0.63	0.21	8.63	41	3.42	9.93
Propuesta 2	0.39	0.20	7.22	72	3.18	9.91
Propuesta 3	0.31	0.23	3.78	49	5.75	8.63

Fuente: Autor

La mejor opción de carrocería según el análisis realizado en este apartado es la presentada en la propuesta 3. Se puede evidenciar que la oposición al movimiento de este modelo es el menor entre todas las propuestas. Cabe resaltar que los resultados de este análisis de simulación aerodinámica son muy significativos a la hora de tomar una selección del modelo de carrocería final.



PÁGINA 121 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

4.2. SELECCIÓN DE PROPUESTA FINAL

Con el análisis realizado tanto en el apartado 3.2 como en el 3.3 se concluyen los siguientes datos.

Tabla 7. Resumen total de datos para selección de carrocería

	Masa (Kg)	Tensión máxima (N/m2)	F.S	CD	CL	Fuerza de arrastre (N)	Presión máxima (Pa)	Velocidad mínima (m/s)	Velocidad máxima (m/s)
P1	13.1	34196.7	166	0.63	0.21	8.63	41	3.42	9.93
P2	12.4	11833.06	123	0.39	0.2	7.22	72	3.18	9.91
Р3	11.1	8436.06	580	0.31	0.23	3.78	49	5.75	8.63

Fuente: Autor

La propuesta 3 es por mucho la que presenta cifras más favorables en términos de masa y coeficientes aerodinámicos, es decir es la más liviana y el aire fluye de manera óptima a su alrededor. Sin embargo, tomar una decisión en función de la tabla 5 no garantiza que sea la correcta. Entonces se utilizará la ecuación de movimiento de un vehículo, la cual permite conocer la fuerza total que el prototipo tiene que vencer para desplazarse.

Se tiene:

$$FT = Fr + Fj + Fd \tag{0}$$

De donde:

FT: Fuerza total a vencer por el vehículo

Fr: Resistencia por rodadura

Fj: Resistencia por inercia

Fd: Resistencia por acción del viento

 Resistencia por rodadura Fr: Para determinar el valor de la resistencia por rodadura se emplea la siguiente ecuación.

$$Fr = fr * Wt \tag{0}$$



PÁGINA 122 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

En donde fr es el coeficiente de resistencia a la rodadura, en este caso particular es igual a 0.0025 que es el valor para las ruedas destinadas a la competencia. (Romero V, 2013) Y Wt es el valor del peso total del vehículo, usando como magnitud de la gravedad 9.81 m/s².|

Tabla 8. Resultados de resistencia por rodadura

Propuesta 1	Propuesta 1 Propuesta 2	
Masa carrocería= 13.1 Kg	Masa carrocería=12.4 Kg	Masa carrocería=11.1 Kg
Fr = 0.32 N	Fr=0.30 N	Fr=0.27 N

Resistencia por inercia Fj: Se tiene la siguiente expresión.

$$Fj = m.a \tag{0}$$

Para determinar el valor de la aceleración se plantea la siguiente suposición, que para los tres casos la carrocería de los prototipos recorre 500 m en línea recta una superficie sin inclinación, partiendo desde el reposo y alcanzando en dicha distancia 30 km/h entonces, empleando la ecuación de velocidad para el movimiento rectilíneo uniformemente variado.

$$V^2 = V_0^2 + 2a.x \tag{0}$$

$$a = \frac{V^2 - V_o^2}{2x} \tag{0}$$

$$a = \frac{8.33 \frac{m}{s} - 0}{2*500 m}$$
 $a = 0.069 m/s 2$

Tabla 9. Resultados de la resistencia por inercia

Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
-------------	-------------	-------------



PÁGINA 123 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Masa carrocería= 13.1 Kg	Masa carrocería=12.4 Kg	Masa carrocería=11.1 Kg
Fj = 0.90 N	Fj=0.85 N	Fj = 0.76 N

 Resistencia por acción del viento Fd: Se calculó en el apartado 3.2.1 como de cargas operación en el análisis estático usando los diferentes valores de coeficiente de arrastre y el valor del área frontal de cada propuesta. Sus valores se muestran de nuevo en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de la resistencia por acción del viento

Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Cd=0.63	Cd=0.39	Cd=0.31
A=0.44	A=0.29	A=0.28
Fd=1.93 N	Fd=1.81N	Fd = 0.15 N

Finalmente, la fuerza total que tiene que vencer el vehículo, según la aplicación de la ecuación de movimiento de un vehículo es la ecuación 16, al aplicar esta ecuación se tienen los resultados mostrados en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados de ecuación de movimiento total

Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
FT = 0.32 + 0.90 + 1.93 N	FT = 0.30 + 0.85 + 1.81 N	FT = 0.27 + 0.76 + 0.15 N



PÁGINA 124 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

FT = 3.15 N	FT=2.96 N	FT=1.18N

Por los resultados obtenidos, podemos ratificar la decisión de elegir la propuesta 3, ya que no solamente tiene las mejores prestaciones en cuanto a peso y aerodinámica, sino además es la carrocería que debe vencer una fuerza de desplazamiento menor, por ende, el consumo energético demandado es reducido.

4.2.1 MODELO SELECCIONADO

En el presente apartado se describirá las características y propiedades del modelo de carrocería finalmente seleccionado.

Desde el punto de vista del modelado y ensamblaje el modelo luce como una figura regular sin mayor variación en su forma. Esta forma es inicialmente creada pensando en los perfiles altamente aerodinámicos NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Es gracias al estudio de los antecedentes de geometrías por las que se puede lograr una resistencia muy baja del aire, que se logra tener un punto de partida para construir lo que finalmente se vería del modo que se ilustra en la figura 127.

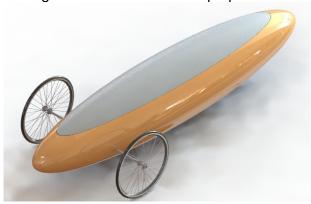


Figura 127. Modelo final de propuesta 3

Fuente: Autor

Esta carrocería que en su análisis estático se simuló con un material compuesto de resina de poliéster reforzado con fibra de vidrio, logró arrojar una capacidad para soportar más de 500 veces las cargas de operación y de diseño, esto es la fuerza de la gravedad y la carga del viento sobre el vehículo.

Al continuar con el análisis aerodinámico se ratificó aún más el hecho de que esta geometría sería muy ventajosa, pues se calcularon los valores de los coeficientes de



PÁGINA 125 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

arrastre y sustentación que dieron 0.31 y 0.23 respectivamente, tomando así aún más diferencia con respecto a los demás parámetros de las diferentes propuestas.

Es entonces cuando, basados en los distintos estudios realizados a lo largo de este informe, se toma una decisión con certeza de cual carrocería sería la más optima en términos aerodinámicos.

4.3 ARCHIVOS CAD

Dentro los resultados más provechosos de este proyecto están los archivos que se crearon el software usado en el desarrollo de este estudio, en ellos se puede sobre escribir ediciones de último momento en materia de dimensiones y en ensamblajes que tengan que ver con el chasis. Este resultado consta de los archivos de las partes del ensamblaje y del archivo de ensamblaje para cada propuesta.

Figura 128. Archivos CAD entregables

Propuesta 1	25/11/2019 9:32 p	Carpeta de archivos	
Propuesta 2	25/11/2019 10:14	Carpeta de archivos	
Propuesta 3	28/11/2019 1:17 a	Carpeta de archivos	
PROTOTIPOS	30/07/2019 5:15 p	SOLIDWORKS Drawing Document	5.484 KB

Fuente: Autor

En la figura 130 se evidencia tres carpetas, que adicionalmente contienen los archivos de simulación estática y aerodinámica de cada propuesta. También encontramos el archivo de dibujo de los planos técnicos, también editable. Todo esto, a manera de anexo se entrega junto con el presente informe.

4.4. RESUMEN DEL DESARROLLO DEL TRABAJO

La carrocería seleccionada para pasar al proceso de construcción es la propuesta 3, ya que, como se dijo presenta mejores características en cuanto a coeficientes aerodinámicos, peso y sobre todo esta opción ofrece una menor resistencia el desplazamiento del vehículo, lo que significa un menor consumo de energía, objetivo

PÁGINA 126 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

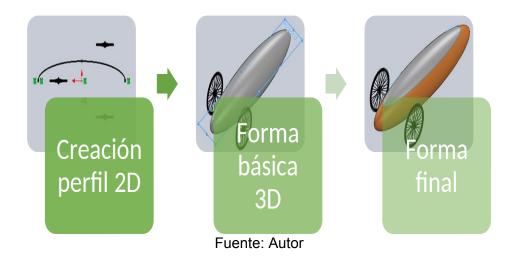
VERSIÓN: 01

principal de un prototipo Shell Eco Marathon. Esta decisión es respuesta del estudio que en este documento se evidenció y que fielmente desarrollo los diferentes análisis con la asistencia del dibujo computarizado.

4.2.1. MODELADO

Mediante el siguiente diagrama se quiere evidenciar el proceso de modelado y ensamblado en tres grandes etapas.

Figura 129.Resumen resultados modelado



4.2.2. ANALISIS ESTATICO

Por medio del uso del complemente Simulation del software usado para el desarrollo de este proyecto, se realizó el preproceso, proceso y postproceso del análisis estático a la carrocería.



PÁGINA 127 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01



Fuente: Autor

4.2.3. ANALISIS AERODINAMICO

Flow Simulation es en este caso el complemento de SOLIDWORKS ® que permitió la simulación de comportamiento aerodinámico de la carrocería del vehículo.

Dominio y mallado

Post proceso

Figura 131. Resumen resultados análisis aerodinámicos

Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES



PÁGINA 128 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

- Es importante conocer la teoría acerca de los cuerpos con coeficientes de arrastre bajos y perfiles previamente validados como aerodinámicos, pues esto da un punto de partida en el diseño y una base constante en el desarrollo del modelado.
- Un análisis estático ayudó en gran manera a definir la elección correcta del material con el que se construirá el modelo final, para este caso puntual se validó el uso de la fibra de vidrio como material para un futuro proceso de manufactura.
- El uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) favorece el análisis aerodinámico, de manera que permite a partir de las simulaciones elegir entre los perfiles creados, el óptimo aerodinámicamente, sin necesidad de pasar a un proceso de real y/o a la etapa de manufactura.
- El cálculo del coeficiente de arrastre es clave para establecer la viabilidad de cada propuesta, por otro lado, el coeficiente de sustentación se hace importante en la medida en que las velocidades del aire y/o del vehículo aumentan.
- De las tres alternativas de carrocería que se tenían se eligió la propuesta tres teniendo en cuenta puntos importantes como el peso de la carrocería, la fuerza total que el prototipo tiene que vencer para desplazarse y el valor del coeficiente de arrastre y sustentación.



PÁGINA 129 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

6. RECOMENDACIONES

Luego de concluir este proyecto de grado, se presenta las siguientes recomendaciones:

- Es recomendable valerse de la bibliografía de perfiles NACA (Comité asesor nacional de aeronáutica, por sus siglas en inglés) en donde se encuentra perfiles aerodinámicos usados en la industria aeronáutica para el diseño de los perfiles alares, ya que esta información se hace muy útil a la hora de buscar un punto de partida en el diseño de un modelo aerodinámico.
- Se recomienda que al momento de usar un modelo diseñado en un software CAD tal como SolidWorks para la aplicación de una simulación sobre este, bien sea, estática o dinámica, se recomienda usar un modelo de simulación simplificado, que como se evidencio en este informe, simplifica de manera significativa el proceso de mallado, evitando así errores al momento de la ejecución.
- Se aconseja definir los valores exactos del grosor de la carrocería en el administrador de vaciados del software, esto para evitar errores en la ejecución de la simulación CFD.
- Se sugiere ensamblar el archivo que contiene la carrocería final junto con el archivo del chasis del vehículo antes de proceder con la manufactura, este último es resultado de un proyecto de investigación paralelo al presente. Esto con la finalidad de validar dimensiones correctas y evitar conflictos entre elementos.



PÁGINA 130 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Budynas, R., & Nisbett, K. (2011). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley: Mc Graw Hill.

Miravete, A. (2012). Materiales Compuestos I. Barcelona: Reverté.

Franzini, J., & Finnemore, J. (2006). Mecánica de fluidos con aplicación en ingeniería. España: MC Graw Hill.

Puertocarrero Quintero, C. (2007). Manual práctico sobre poliéster (plásticos) reforzado con

Fibra de vidrio (prfv) (Tesis de pregrado). Universidad tecnológica de Bolívar, Cartagena de indias.

Coackley N. (1994). Construcción de embarcaciones pesqueras en fibra de vidrio. Italia: Fao Documentos Tecnicos de Pesca y Acuicultura.

García Martín, D., & Marcelino Sádaba, S. (2010). Estudio de la capacidad aerodinámica de carrocerías de vehículos categoría CM (Tesis de pregrado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Pamplona.

Gomez Gonzáles, S. (2017). Mallado y simulación CFD de automóvil (Tesis de maestría). Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Cataluña.

López, A. C. (2015). Resolucion númerica de las ecuaciones de Navier-Stokes. España.

López, M., Mancuso, F., Aguirre, R. M., Herderson, G. R., & Coussirat, M. G. (2016). Uso de la mecánica de fluidos computacional como apoyo a la enseñanza de la mecánica de los fluidos en la universidad. En Mecánica computacional (págs. 1597-1616). Córdoba.

Martínez de la Calle, J., & Ballesteros Tajadura, R. (2004-2005). Flujo viscoso en conductos.

Universidad del Oviedo.

Morillo, D. M. (2016). Mejora aerodinámica de un turismo (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Mott, R. (2006). Mecánica de fluidos. México: Pearson Educación.

Murillo Fuentes, C. (2016). Estudio mediante CFD del alerón trasero de un monoplaza con el DRS abierto y cerrado de diferentes circuitos (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.



PÁGINA 131 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

Santamaría Bermeo, J., & Calero Venegas, J. (2012). Análisis de las propiedades aerodinámicas, efecto suelo y su aplicación en vehículos convencionales especificamente en el Chevrolet Aveo Sedán como forma para aumentar la seguridad activa (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga.

Carbajal Suárez, Y. (2010). Sector automotriz: reestructuración tecnológica y reconfiguración del mercado mundial. Paradigma económico, 24-52.

Casa Tipán, E. (2016). Modelación númerica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional CFD, programa flow 3D (Tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Costarelli, S., Paz, R., Storti, M., & Dalcin, L. D. (2011). Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando CUDA. En Mecánica computacional (págs. 2979-3008). Rosario, Argentina.

Cumbe Fárez, E. S., & Rockwood Iglesias, R. E. (2009). Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional CFD (Tesis de pregrado). Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.

Santamaría Bermeo, J., & Calero Venegas, J. (2012). Analisis de las propiedades aerodinámicas, efecto suelo y su aplicación en vehículos convencionales especificamente en el Chevrolet Aveo Sedán como forma para aumentar la seguridad activa (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga.

Shames, I. (1995). Mecánica de fluidos. Santa Fe de Bogotá: McGRAW-HILL.

Solidworks (02 de septiembre de 2019). SOLIDWORKS Flow Simulation recuperado el 02 de septiembre de 2019 de https://www.solidworks.com/es/package/solidworks-flow-simulation

Tobón, S. (2006). Aspectos básicos de la formación basada en competencias. Talca: Proyecto Mesesup I.

Xamán, J., & Gijón Rivera, M. (2016). Dinámica de fluidos computacional para ingenieros. EE.UU: Palibrio.



PÁGINA 132 DE 132

R-DC-95

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

VERSIÓN: 01

8. ANEXOS

8.1 PLANOS TECNICOS

El siguiente plano técnico se entregará en forma física junto con el archivo de dibujo editable en el cd que lleva el presente informe final.

