



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE
AUTOBUSES: MODELACIÓN CFD Y VALIDACIÓN CON
PROTOTIPOS A ESCALA

Autores:

Jorge Aníbal Manobanda Guangasi

Christian Omar Silva Villacrés

Tutor:

Wladimir Eduardo Banda Barragán PhD.

AMBATO - ECUADOR

2018

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo de investigación sobre el tema: “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE AUTOBUSES: MODELACIÓN CFD Y VALIDACIÓN CON PROTOTIPOS A ESCALA”, ejecutado por los señores Jorge Aníbal Manobanda Guangasi y Christian Omar Silva Villacrés, egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, de la Universidad Técnica de Ambato, CERTIFICO que el presente trabajo de investigación fue elaborado en su totalidad por los autores, que todos los capítulos han sido revisados, y que el trabajo se ha concluido satisfactoriamente.

Ambato, julio de 2018

Wladimir Eduardo Banda Barragán PhD

Tutor del Proyecto

AUTORÍA DEL TRABAJO

Exponemos que el contenido del actual trabajo experimental: “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE AUTOBUSES: MODELACIÓN CFD Y VALIDACIÓN CON PROTOTIPOS A ESCALA”, de la misma forma que la autenticidad de las ideas, procesos, opiniones, resultados, conclusiones, son de nuestra responsabilidad, en calidad de autores del proyecto.

Ambato, julio de 2018

Jorge Aníbal Manobanda Guangasi

C.I: 2000102430

Autor del Trabajo Experimental

Christian Omar Silva Villacrés

C.I: 1804534350

Autor del Trabajo Experimental

DERECHOS DEL AUTOR

Autorizamos a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él como un documento aprovechable para la lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la institución. Cedemos los derechos en línea patrimonial de nuestro Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además aprobamos la reproducción de este Trabajo Experimental, dentro de las regulaciones de la Universidad, esperando que esta reproducción no contenga una ganancia en fines de lucro y se realice respetando nuestros derechos de autor.

Jorge Aníbal Manobanda Guangasi

C.I: 2000102430

Christian Omar Silva Villacrés

C.I: 1804534350

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental realizado por el estudiante Jorge Aníbal Manobanda Guangasi de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE AUTOBUSES: MODELACIÓN CFD Y VALIDACIÓN CON PROTOTIPOS A ESCALA”.

Ambato, Septiembre de 2018

Para constancia firman:

.....
Ing. Mg. César Arroba

.....
Ing. Mg. Diego Nuñez

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental realizado por el estudiante Christian Omar Silva Villacrés de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE AUTOBUSES: MODELACIÓN CFD Y VALIDACIÓN CON PROTOTIPOS A ESCALA”.

Ambato, Septiembre de 2018

Para constancia firman:

.....
Ing. Mg. César Arroba

.....
Ing. Mg. Diego Nuñez

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi Dios, por permitirme llegar muy lejos en mi vida, sabiendo que este logro no será el único pero será sí una base para seguir adelante.

A los pilares fundamentales en mi vida, mi mamá María y mi papá Wilson, quienes con su apoyo moral, sentimental y económicamente durante mi vida como estudiante desde la escuela hasta la universidad y poder realizar mi sueño de convertirme en un profesional, a mis hermanos que desde donde se encontraban me apoyaron incondicionalmente.

A mi familia maternal y paternal que con sus palabras de aliento y confianza me guiaron, en especial a mi tío Alfonso que desde donde está me cuida y bendice siempre.

A mis maestros por compartir sus conocimientos adquiridos y al tutor de tesis por ayudarme a realizar mi trabajo de titulación de la mejor manera.

A mis amigos, panas y compañeros por sus aportes hechos para que yo haya podido llegar tan lejos, y a quienes no pensaron que iba a llegar lejos.

Jorge Aníbal Manobanda Guangasi

DEDICATORIA

Esta tesis dedico a Dios, por todo lo bueno y maravilloso que ha sido conmigo, por día a día cobijarme con su amor, por darme las fuerzas necesarias, voluntad y sabiduría para cumplir mi más anhelada meta, llegar a ser un profesional, gracias a Dios y a la vida que me ha dado tanto, tú me has llevado por el camino correcto, poniendo personas que con su ejemplo me ayudaron a ser mejor persona y en los momentos difíciles nunca caer al contrario saber que siempre hay que levantarse y continuar para ser mejor.

A mis amados padres Hugo Silva y Rosa Villacrés, por haberme dado la vida que con su ejemplo de personas trabajadoras me guiaron y han hecho de mí la persona que soy, su afecto y cariño son los detonantes de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ustedes, han estado ahí siempre apoyándome en mis sueños, desde muy pequeño han inculcado valores en mí, enseñándome a luchar para alcanzar mis metas.

A mis hermanos David y Margarita que con su apoyo incondicional han estado ahí siempre pendiente de mí, que no importa los problemas sino las ganas con que te levantas para ser mejor, este triunfo también es de ustedes.

A mis sobrinos Jenner, Alessandro y Nicolás quiero decirles que por más difícil que parezca el camino nunca dejen de luchar, a quienes les dejo un legado de esfuerzo y sacrificio, ustedes son mi inspiración para ser mejor cada día.

A mi Fátima por llegar a mi vida y juntos de la mano compartir momentos hermosos, que con su compañía y amor me ha enfocado a culminar mi tesis, siempre luchando juntos por cumplir nuestras metas.

A todos mis amigos que compartí mi vida Universitaria y pasamos momentos inolvidables entre ellos Carolina, Katherine, Daniel y Miguel gracias por su apoyo y palabras de aliento cuando más lo necesite ahí estaban ustedes y sin pedir nada a cambio, son para mí una gran bendición, no me queda decirles un Dios les pague a todos.

Christian Omar Silva Villacrés

AGRADECIMIENTOS

Detrás de ti solo hay recuerdos, a tu lado personas que te quieren, al frente un futuro hermoso y arriba un Dios que te escucha, te cuida, te ama y te bendice.

Agrademos a Dios ya que su amor y su bondad no tiene fin, nos permite sonreír en nuestros triunfos, que son el resultado de esfuerzo y sacrificio, aquel que en todo momento está con nosotros ayudándonos a aprender de nuestros errores.

El tiempo de Dios es perfecto y al mandarnos a una persona que además de ser un profesional es una excelente persona. Un profundo agradecimiento al director de nuestra tesis, al Dr. Wladimir Banda Barragán PhD. que con su orientación, paciencia y guía en este trabajo de tesis hemos llegado a su culminación, su capacidad y conocimiento científico hacen que para nosotros sea un ejemplo a seguir, a las personas buenas solo le pasan cosas buenas, todas estas virtudes le hace merecedor de nuestro afecto y gratitud, que Dios le bendiga y mil gracias.

Gracias al Ing. César Arroba, Ing. Diego Nuñez, y al Dr. Federico Zertuche PhD. que con sus mentes prodigiosas y con sus criterios muy acertados han sido entes importantes para cumplir con nuestra meta.

Un gran agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato, y a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por habernos acogido y formarnos como profesionales. Pisar sus aulas es un privilegio, formarse en la mejor carrera es un orgullo.

A nuestros profesores de toda nuestra vida estudiantil, quienes nos impartieron sus conocimientos, que hoy en día podemos sentirnos orgullosos de todo lo que ustedes pudieron darnos, sin duda la docencia es dar todo lo mejor, no guardarse nada y eso ha servido para formar líderes dentro de la sociedad.

Un agradecimiento especial al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y por medio de este al Director del INAMHI, Lcdo. José Olmedo Morán, y a los Ing. Marcelo Ayabaca, David Tonato y Iván Rodríguez por las gestiones realizadas al efectuar las pruebas en el túnel de viento.

Un agradecimiento muy especial a COINAV S.A y por medio de este a su gerente Ing. Jorge Cepeda y a la Ing. Verónica Cepeda por abrirme las puertas de la empresa brindándome la oportunidad de tener mi primera experiencia laboral. Dios le pague por todo el apoyo brindado.

Agradecemos a los creadores de VisIt, Gnuplot y Látex por brindarnos sus herramientas de código abierto para la realización de este trabajo.

“Esfuézate y se valiente, no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo adondequiera que vayas.”

Josué 1:9

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA	I
APROBACIÓN DEL TUTOR	II
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TESIS	III
DERECHO DEL AUTOR	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	V
DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTOS	IX
ÍNDICE DE CONTENIDOS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
ÍNDICE DE TABLAS	XX
RESUMEN EJECUTIVO	XXV
CAPÍTULO I	1
1 ANTECEDENTES	1
1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL	1
1.2 ANTECEDENTES	1
1.3 JUSTIFICACIÓN	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	5
1.5.1 ALCANCES	5
1.5.2 LIMITACIONES	6
CAPÍTULO II	7
2 FUNDAMENTACIÓN	7
2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
2.1.1 FLUIDO	7
2.1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS	7
2.1.1.1.1 NEWTONIANOS	7
2.1.1.1.2 NO NEWTONIANOS	7

2.1.2	PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	8
2.1.2.1	DENSIDAD	8
2.1.2.2	VISCOSIDAD	8
2.1.2.2.1	VISCOSIDAD DINÁMICA	9
2.1.2.2.2	VISCOSIDAD CINEMÁTICA	9
2.1.3	NÚMERO DE REYNOLDS	10
2.1.3.1	FLUJO LAMINAR	10
2.1.3.2	FLUJO DE TRANSICIÓN	10
2.1.3.3	FLUJO TURBULENTO	10
2.1.4	CAPA LÍMITE	11
2.1.4.1	CAUSAS Y EFECTOS DE LA CAPA LÍMITE	12
2.1.5	PRINCIPIO DE BERNOULLI	12
2.1.6	ESTELA	13
2.1.7	SEPARACIÓN O DESPRENDIMIENTO	13
2.1.8	VORTICIDAD	14
2.1.9	NÚMERO DE STROUHAL	14
2.1.10	FRECUENCIA DE DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES	15
2.1.11	DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	15
2.1.12	ECUACIONES DE NAVIER- STOKES	15
2.1.13	ECUACIONES DE EULER	17
2.1.14	MODELOS DE TURBULENCIA	17
2.1.14.1	SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA DNS	18
2.1.14.2	SIMULACIÓN GRANDES REMOLINOS LES	18
2.1.14.3	PROMEDIADO DE REYNOLDS DE LAS ECUACIONES DE N-S RANS	18
2.1.14.4	MODELO DE TURBULENCIA $\kappa - \epsilon$	19
2.1.15	ENFOQUE DE DISCRETIZACIÓN	20
2.1.15.1	MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS	20
2.1.15.1.1	ECUACIÓN DE SEMI-DISCRETIZACIÓN	21
2.1.15.1.2	MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN	22
2.1.15.1.3	ALGORITMOS DE ACOPLA PRESIÓN-VELOCIDAD	22
2.1.16	AERODINÁMICA AUTOMOTRIZ	24
2.1.17	FUERZAS IMPLICADAS	25
2.1.17.1	FUERZA DE SUSTENTACIÓN	25
2.1.17.2	RESISTENCIA AERODINÁMICA (ARRASTRE)	25
2.2	HIPÓTESIS	26
2.2.1	VARIABLE INDEPENDIENTE	26
2.2.2	VARIABLE DEPENDIENTE	26

CAPÍTULO III

27

3	METODOLOGÍA	27
3.1	NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN	27
3.1.1	INVESTIGACIÓN NUMÉRICA	27
3.1.1.1	SOFTWARE	27
3.1.1.1.1	AutoCAD	27
3.1.1.1.2	ANSYS Fluent	27
3.1.1.1.3	VisIt	28
3.1.1.1.4	Gnuplot	28
3.1.1.1.5	Látex	28
3.1.2	INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	28
3.1.2.1	DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS	29
3.1.2.1.1	ANEMÓMETRO	29
3.1.2.1.2	MEDIDOR DE FLUJO DE AIRE	29
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA	30
3.2.1	POBLACIÓN	30
3.2.2	MUESTRA	31
3.3	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	32
3.3.1	VARIABLE INDEPENDIENTE	33
3.3.2	VARIABLE DEPENDIENTE	33
3.4	PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS	33
3.4.1	CALIBRACIÓN DE RESULTADOS	34
3.4.1.1	MODELOS DE REFERENCIA	34
3.4.1.2	MODELOS DE ANÁLISIS SIN MODELOS DE TURBULENCIA	38
3.4.1.3	MODELOS DE ANÁLISIS CON MODELOS DE TURBULENCIA	39
3.5	PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	40
	CAPÍTULO IV	41
	PARTE I: ESTUDIO AERODINÁMICO	41
4	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	41
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MODELOS DE REFERENCIA PARA CALIBRACIÓN	41
4.2	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE MODELOS DE REFERENCIA	42
4.3	ANÁLISIS DE AUTOCONVERGENCIA NUMÉRICA	50
4.4	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE LOS MODELOS DE ESTUDIO	53

4.4.1	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE MODELOS GEOMÉTRICOS SEMEJANTES A AUTOBUSES Y MODELOS GEOMÉTRICOS DE AUTOBUSES	53
4.4.2	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE MODELOS GEOMÉTRICOS DE AUTOBUSES A DIFERENTES VELOCIDADES	60
4.4.2.1	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 A DIFERENTES VELOCIDADES	60
4.4.2.2	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 A DIFERENTES VELOCIDADES	64
4.5	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO MEDIANTE EL USO DEL MODELO DE TURBULENCIA ($\kappa - \epsilon$)	69
4.5.1	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1.	69
4.5.2	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2.	74
4.5.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS FUERZAS AERODINÁMICAS ENTRE LOS MODELOS 1 Y 2	80
PARTE II: PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS		82
4.6	PLANTEAMIENTO DE GEOMETRÍAS MODIFICADAS DE LOS AUTOBUSES.	82
4.6.1	MODIFICACIONES PLANTEADAS PARA EL MODELO 1	83
4.6.2	MODIFICACIONES PARA EL MODELO 2	83
4.6.3	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 CON MODIFICACIONES	84
4.6.3.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE GEOMETRÍA ORIGINAL Y MODIFICADA DEL MODELO 1 EN ESTUDIO.	90
4.6.4	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 CON MODIFICACIONES	92
4.6.4.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE GEOMETRÍA ORIGINAL Y MODIFICADA DEL MODELO 2 EN ESTUDIO.	98
4.7	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE MODELOS DE ESTUDIO CON LLANTAS	100
4.7.1	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 SIN MODIFICACIONES	100
4.7.2	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 CON MODIFICACIONES	105

4.7.3	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELO 1 CON Y SIN MODIFICACIONES, CON Y SIN LLANTAS	111
4.7.4	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 SIN MODIFICACIONES	113
4.7.5	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 CON MODIFICACIONES	119
4.7.6	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELO 2 CON Y SIN MODIFICACIONES, CON Y SIN LLANTAS	125
4.8	ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE	127
4.8.1	RESISTENCIA AERODINÁMICA	127
4.8.2	RESISTENCIA A LA RODADURA	127
4.8.3	RESISTENCIA POR PENDIENTE	128
4.8.4	POTENCIA DEL MOTOR	128
4.8.5	CONSUMO DE COMBUSTIBLE	128
4.8.6	ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE	129
4.8.7	TABLA RESUMEN DE LOS CONSUMOS DE COMBUSTIBLE	130
4.9	CONSUMO COMPUTACIONAL	132
PARTE III: CONTRASTE DEL ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL		133
4.10	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE LOS MODELOS DE ESTUDIO	133
4.10.1	PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN	133
4.10.1.1	PROTOTIPOS A ESCALA	133
4.10.1.2	MONTAJE DE LOS MODELOS AL TÚNEL DE VIENTO	134
4.10.1.3	UBICACIÓN DE SENSORES	135
4.10.1.4	TOMA DE DATOS	137
4.11	VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS	138
4.11.1	VERIFICACIÓN DE NORMALIDAD	138
4.11.2	DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS	139
4.11.2.1	DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DEL COEFICIENTE DE DRAGADO	140
4.11.2.2	DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN	142
4.11.3	PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS	144
4.11.3.1	MATRIZ DE CORRELACIÓN DE DATOS	144
4.12	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES	145
4.12.1	ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA DE DESPRENDIMIENTO EXPERIMENTAL	145
4.12.2	ANÁLISIS DE LA LONGITUD DE LA ONDA	146
4.12.3	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DRAGADO Y SUSTENTACIÓN	149

4.12.3.1	ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE DE DRAGADO	149
4.13	COMPARACIÓN DATOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES	151
4.13.1	COMPARACIÓN DE COEFICIENTE DE DRAGADO Y SUSTEN- TACIÓN DEL MODELO 1 Y 2	151
4.13.2	COMPARACIÓN DE VELOCIDAD, PRESIÓN NUMÉRICA Y EX- PERIMENTAL	153
CAPÍTULO V		172
5	CONCLUSIONES	172
6	RECOMENDACIONES	175
BIBLIOGRAFÍA		176
7	ANEXOS	180
7.1	DERIVACIÓN DE LAS ECUACIONES DE EULER	180
7.1.1	DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA MASA (CONSERVACIÓN DE CONTINUIDAD)	180
7.1.2	DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DEL MO- MENTO LINEAL	183
7.1.3	DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	188
7.1.4	DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO DEL GAS	191
7.2	PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	194
7.3	COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL RODAMIENTO	194
7.4	PESO BRUTO VEHICULAR DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM- 012-SCT-2-2014	195
7.5	FICHA TÉCNICA CHASIS MERCEDES BENZ OF 1724	195
7.6	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DE PRESIÓN . . .	196
7.7	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DE VELOCIDAD	214

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Viscosidad	8
Figura 2.2	Viscosidad Dinámica (τ), velocidad (u) y posición del fluido (y).	9
Figura 2.3	Tipos de flujo	11
Figura 2.4	Capa límite sobre cuerpos	11
Figura 2.5	Conservación de energía.	12
Figura 2.6	Estela y separación o desprendimiento	14
Figura 2.7	Descripción del proceso de generación y dispersión de turbulencia.	17
Figura 2.8	Nivel de complejidad de modelos de turbulencia.	19
Figura 2.9	Método de los volúmenes finitos centrado en las celdas.	21
Figura 2.10	Método de los volúmenes finitos centrado en los vértices.	21
Figura 2.11	Fuerza de Sustentación	25
Figura 3.12	Túnel de viento cerrado del INAMHI	29
Figura 3.13	Anenómetro de Hilo Caliente	29
Figura 3.14	Medidor de Flujo de Aire	30
Figura 3.15	Especificaciones del Fluke 922	30
Figura 3.16	Dimensiones de la geometría	36
Figura 3.17	Número de divisiones en la geometría	36
Figura 3.18	Condiciones iniciales de la geometría	37
Figura 4.19	Coefficiente de sustentación (C_l) para calibración 1 y calibración 2.	49
Figura 4.20	Coefficiente de sustentación (C_l) para calibración 3 y calibración 4.	50
Figura 4.21	Autoconvergencia del coeficiente de sustentación (C_l).	51
Figura 4.22	Autoconvergencia del coeficiente de dragado (C_d).	52
Figura 4.23	Error relativo de la autoconvergencia del C_d	52
Figura 4.24	C_d del modelo rectángulo sin redondeos y rectángulo con redondeos.	54
Figura 4.25	C_d de los modelos (rojo) Modelo 1, (azul) Modelo 2.	54
Figura 4.26	C_d de los modelos RSR, RCR, M1 y M2 a 90 km h^{-1}	59
Figura 4.27	Coefficiente de dragado C_d de M1 a diferentes velocidades	63
Figura 4.28	Fuerza de dragado (F_d) de M1 a diferentes velocidades	64
Figura 4.29	Coefficiente de dragado (C_d) de M2 a diferentes velocidades.	67
Figura 4.30	Fuerza de dragado (F_d) de M2 a diferentes velocidades	68
Figura 4.31	Coefficiente de dragado (C_d) de M1 a diferentes velocidades	72
Figura 4.32	Fuerza de dragado (F_d) de M1 a diferentes velocidades	73
Figura 4.33	Coefficiente de sustentación (C_l) de M1 a diferentes velocidades	74
Figura 4.34	Fuerza de sustentación (F_l) de M1 a diferentes velocidades	74
Figura 4.35	Coefficiente de dragado (C_d) de M2 a diferentes velocidades	77
Figura 4.36	Fuerza de dragado (F_d) de M2 a diferentes velocidades	78
Figura 4.37	Coefficiente de sustentación (C_l) de M2 a diferentes velocidades	79
Figura 4.38	Fuerza de sustentación (F_l) de M2 a diferentes velocidades	79

Figura 4.39	Interpretación de fuerzas aerodinámicas.	81
Figura 4.40	Visibilidad frontal superior del conductor	82
Figura 4.41	Perfil M2 con las modificaciones en los puntos A, B, C y D.	83
Figura 4.42	Perfil M2 con las modificaciones en los puntos A, B y C	84
Figura 4.43	Coefficiente de dragado (C_d) de M1 modificado a diferentes velocidades	87
Figura 4.44	Fuerza de dragado (F_d) de M1 modificado a diferentes velocidades . .	87
Figura 4.45	Coefficiente de sustentación (C_l) de M1 modificado a diferentes veloci- dades	89
Figura 4.46	Fuerza de sustentación (F_l) de M1 modificado a diferentes velocidades	89
Figura 4.47	Contraste del (C_d) entre modelo 1 original y modificado	91
Figura 4.48	Contraste del (C_l) entre modelo 1 original y modificado	91
Figura 4.49	Coefficiente de dragado (C_d) de M2 modificado a diferentes velocidades	95
Figura 4.50	Fuerza de dragado (F_d) de M2 modificado a diferentes velocidades . .	95
Figura 4.51	Coefficiente de sustentación (C_l) de M2 modificado a diferentes veloci- dades	96
Figura 4.52	Fuerza de sustentación (F_l) de M2 modificado a diferentes velocidades	97
Figura 4.53	Contraste del (C_d) entre modelo 2 original y modificado	98
Figura 4.54	Contraste del (C_l) entre modelo 2 original y modificado	99
Figura 4.55	Coefficiente de dragado (C_d) de M1 a diferentes velocidades	100
Figura 4.56	Fuerza de dragado (F_d) de M1 a diferentes velocidades	103
Figura 4.57	Coefficiente de sustentación (C_l) de M1 a diferentes velocidades	104
Figura 4.58	Fuerza de sustentación (F_l) de M1 a diferentes velocidades	105
Figura 4.59	Coefficiente de dragado (C_d) de M1 modificado a diferentes velocidades	108
Figura 4.60	Fuerza de dragado (F_d) de M1 modificado a diferentes velocidades . .	109
Figura 4.61	Coefficiente de sustentación (C_l) de M1 modificado a diferentes veloci- dades	110
Figura 4.62	Fuerza de sustentación (F_l) de M1 modificado a diferentes velocidades	110
Figura 4.63	Contraste del (C_d) de M1 sin modificaciones, con y sin llantas	111
Figura 4.64	Contraste del (C_l) de M1 sin modificaciones, con y sin llantas	111
Figura 4.65	Contraste del (C_d) de M1 modificado, con y sin llantas	112
Figura 4.66	Contraste del (C_l) de M1 modificado, con y sin llantas	112
Figura 4.67	Coefficiente de dragado (C_d) de M2 a diferentes velocidades	114
Figura 4.68	Fuerza de dragado (F_d) de M2 a diferentes velocidades	117
Figura 4.69	Coefficiente de sustentación (C_l) de M2 a diferentes velocidades	118
Figura 4.70	Fuerza de sustentación (F_l) de M2 a diferentes velocidades	118
Figura 4.71	Coefficiente de dragado (C_d) de M2 modificado a diferentes velocidades	122
Figura 4.72	Fuerza de dragado (F_d) de M2 modificado a diferentes velocidades . .	123
Figura 4.73	Coefficiente de sustentación (C_l) de M2 modificado a diferentes veloci- dades	123
Figura 4.74	Fuerza de sustentación (F_l) de M2 modificado a diferentes velocidades	124

Figura 4.75	Contraste del (C_d) de M2 sin modificaciones, con y sin llantas	125
Figura 4.76	Contraste del (C_l) de M2 sin modificaciones, con y sin llantas	125
Figura 4.77	Contraste del (C_d) de M2 modificado, con y sin llantas	126
Figura 4.78	Contraste del (C_l) de M2 modificado, con y sin llantas	126
Figura 4.79	Montaje de los modelos en la cámara de prueba	135
Figura 4.80	Montaje de los modelos en la cámara de prueba	138
Figura 4.81	Coefficiente de dragado del modelo 1 sin llantas.	140
Figura 4.82	Coefficiente de dragado del modelo 1 con llantas.	140
Figura 4.83	Coefficiente de dragado del modelo 2 sin llantas.	141
Figura 4.84	Coefficiente de dragado del modelo 2 con llantas.	141
Figura 4.85	Coefficiente de sustentación del modelo 1 sin llantas.	142
Figura 4.86	Coefficiente de sustentación del modelo 1 con llantas.	142
Figura 4.87	Coefficiente de sustentación del modelo 2 sin llantas.	143
Figura 4.88	Coefficiente de sustentación del modelo 2 con llantas.	143
Figura 4.89	Prueba experimental mediante el uso de cuerdas como técnica de visualización de flujo.	147
Figura 4.90	Ecuación de la onda	149
Figura 4.91	Comparación velocidad numérica y experimental punto 1	154
Figura 4.92	Comparación velocidad numérica y experimental punto 3	155
Figura 4.93	Comparación velocidad numérica y experimental punto 4	156
Figura 4.94	Comparación velocidad numérica y experimental punto 7	157
Figura 4.95	Comparación presión numérica y experimental punto 1	158
Figura 4.96	Comparación presión numérica y experimental punto 2	159
Figura 4.97	Comparación presión numérica y experimental punto 3	160
Figura 4.98	Comparación presión numérica y experimental punto 4	161
Figura 4.99	Comparación presión numérica y experimental punto 5	162
Figura 4.100	Comparación velocidad numérica y experimental punto 1	163
Figura 4.101	Comparación velocidad numérica y experimental punto 3	164
Figura 4.102	Comparación velocidad numérica y experimental punto 4	165
Figura 4.103	Comparación velocidad numérica y experimental punto 7	166
Figura 4.104	Comparación presión numérica y experimental punto 1	167
Figura 4.105	Comparación presión numérica y experimental punto 2	168
Figura 4.106	Comparación presión numérica y experimental punto 3	169
Figura 4.107	Comparación presión numérica y experimental punto 4	170
Figura 4.108	Comparación presión numérica y experimental punto 5	171
Figura 7.109	Conservación de masa	180
Figura 7.110	Ecuación de la Continuidad	182
Figura 7.111	Fluido en Sistema Aislado	183
Figura 7.112	Sistema Aislado Unidireccional	184
Figura 7.113	Sistema Aislado Bidireccional	185

Figura 7.114 Fuerza Gravitatoria	185
Figura 7.115 Características de un fluido	188
Figura 7.116 Grados de libertad del gas monoatómico	191
Figura 7.117 Grados de libertad del gas diatómico	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Listado de fabricantes de unidades homologadas en el servicio interprovincial	31
Tabla 3.2	Geometrías de modelos de análisis.	32
Tabla 3.3	Operacionalización de Variable Independiente.	33
Tabla 3.4	Operacionalización de Variable Dependiente.	33
Tabla 3.5	Condiciones de frontera	34
Tabla 3.6	Geometrías de referencia y calibración.	35
Tabla 3.7	Propiedades del mallado	36
Tabla 3.8	Condiciones de Frontera	37
Tabla 3.9	Dimensiones generales de carrocerías	38
Tabla 3.10	Condiciones de iniciales a 90 km h^{-1}	38
Tabla 3.11	Mallado de geometrías para modelos de análisis	39
Tabla 4.12	Resultados de modelos de referencia	42
Tabla 4.13	Presión a diferentes tiempos de las simulaciones	44
Tabla 4.14	Presión a diferentes tiempos de las simulaciones	45
Tabla 4.15	Vorticidad a diferentes tiempos de las simulaciones	47
Tabla 4.16	Vorticidad a diferentes tiempos de las simulaciones	48
Tabla 4.17	Resultados del análisis de autoconvergencia de coeficiente de dragado de modelo de calibración 4.	53
Tabla 4.18	Presión a diferentes tiempos de los modelos RSR y RCR con velocidad a 90 km h^{-1}	55
Tabla 4.19	Vorticidad a diferentes tiempos de los modelos RSR y RCR con velocidad a 90 km h^{-1}	56
Tabla 4.20	Presión a diferentes tiempos de los modelos M1 y M2 con velocidad a 90 km h^{-1}	57
Tabla 4.21	Vorticidad a diferentes tiempos de los modelos M1 y M2 con velocidad a 90 km h^{-1}	58
Tabla 4.22	Comparación de resultados de C_d para los modelos de estudios.	59
Tabla 4.23	Presión a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades.	61
Tabla 4.24	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades.	62
Tabla 4.25	Comparación de C_d para el M1 a diferentes velocidades.	63
Tabla 4.26	Comparación de fuerza de dragado (F_d) para el M1 a diferentes velocidades.	64
Tabla 4.27	Presión a diferentes tiempos de modelo 2 a diferentes velocidades.	65
Tabla 4.28	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades.	66
Tabla 4.29	Comparación de coeficiente de dragado (C_d) para el M2 a diferentes velocidades.	67

Tabla 4.30	Comparación d la fuerza de dragado (F_d) para el M2 a diferentes velocidades.	68
Tabla 4.31	Presión a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.	70
Tabla 4.32	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.	71
Tabla 4.33	Comparación de coeficiente de dragado (C_d) para el M1 a diferentes velocidades.	72
Tabla 4.34	Comparación de fuerza de dragado (C_d) para el M1 a diferentes velocidades.	73
Tabla 4.35	Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.	75
Tabla 4.36	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.	76
Tabla 4.37	Comparación de coeficiente de dragado (C_d) para el M2 a diferentes velocidades.	77
Tabla 4.38	Comparación de Fuerza de dragado (F_d) para el M2 a diferentes velocidades.	78
Tabla 4.39	Comparación de C_d y F_d entre M1 y M2 a diferentes velocidades. . . .	80
Tabla 4.40	Comparación de C_1 y F_1 entre M1 y M2 a diferentes velocidades. . . .	80
Tabla 4.41	Presión a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modificaciones.	85
Tabla 4.42	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modificaciones.	86
Tabla 4.43	Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M1 modificado a diferentes velocidades.	88
Tabla 4.44	Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M1 modificado a diferentes velocidades.	90
Tabla 4.45	Comparación de C_d de M1 entre modelo geométrico original y modificado a diferentes velocidades.	92
Tabla 4.46	Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificaciones.	93
Tabla 4.47	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificaciones.	94
Tabla 4.48	Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M2 modificado a diferentes velocidades.	96
Tabla 4.49	Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M2 modificado a diferentes velocidades.	97
Tabla 4.50	Comparación de C_d de M2 entre modelo geométrico original y modificado a diferentes velocidades.	99

Tabla 4.51	Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades sin modificación con llantas	101
Tabla 4.52	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades sin modificación con llantas	102
Tabla 4.53	Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M1 con llantas a diferentes velocidades.	103
Tabla 4.54	Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M1 con llantas a diferentes velocidades.	104
Tabla 4.55	Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades con modificación y llantas	106
Tabla 4.56	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades con modificación y llantas	107
Tabla 4.57	Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M1 modificado con llantas a diferentes velocidades.	108
Tabla 4.58	Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M1 modificado con llantas a diferentes velocidades.	109
Tabla 4.59	Comparación de parámetros aerodinámicos para M1 con y sin modificaciones, con y sin llantas a diferentes velocidades.	113
Tabla 4.60	Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades sin modificación con llantas	115
Tabla 4.61	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades sin modificación con llantas	116
Tabla 4.62	Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M2 con llantas a diferentes velocidades.	117
Tabla 4.63	Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M2 con llantas a diferentes velocidades.	119
Tabla 4.64	Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificación y llantas	120
Tabla 4.65	Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificación y llantas	121
Tabla 4.66	Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M2 modificado con llantas a diferentes velocidades.	122
Tabla 4.67	Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M2 modificado con llantas a diferentes velocidades.	124
Tabla 4.68	Comparación de parámetros aerodinámicos para M2 con y sin modificaciones, con y sin llantas a diferentes velocidades.	127
Tabla 4.69	Datos Técnicos del Chasis OF 1724/59	129
Tabla 4.70	Resumen de los consumos de combustible para los diferentes casos estudiados	131
Tabla 4.71	Recursos computacionales	132

Tabla 4.72	Modelos de estudio a escala	134
Tabla 4.73	Ubicación de los sensores para presión	136
Tabla 4.74	Ubicación de los sensores para velocidad	137
Tabla 4.75	Pruebas de normalidad con los datos del coeficiente de dragado	139
Tabla 4.76	Prueba no paramétrica para el coeficiente de dragado	144
Tabla 4.77	Prueba no paramétrica para el coeficiente de sustentación	144
Tabla 4.78	Matriz de correlación de coeficientes aerodinámicos.	145
Tabla 4.79	Resultados de Modelos 1 y 2	146
Tabla 4.80	Resultados experimentales de modelo 1	150
Tabla 4.81	Resultados experimentales de modelo 2	151
Tabla 4.82	Comparación datos numéricos y experimentales C_d	151
Tabla 4.83	Comparación datos numéricos y experimentales C_l	152
Tabla 4.84	Comparación datos numéricos y experimentales C_d	152
Tabla 4.85	Comparación datos numéricos y experimentales C_l	153
Tabla 7.86	Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones y con modificaciones en el punto 1	196
Tabla 7.87	Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones y con modificaciones en el punto 1.	197
Tabla 7.88	Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 2.	198
Tabla 7.89	Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 2.	199
Tabla 7.90	Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 2.	200
Tabla 7.91	Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 2.	201
Tabla 7.92	Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 3.	202
Tabla 7.93	Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 3.	203
Tabla 7.94	Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 3.	204
Tabla 7.95	Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 3.	205
Tabla 7.96	Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 4.	206
Tabla 7.97	Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 4.	207
Tabla 7.98	Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 4.	208
Tabla 7.99	Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 4.	209
Tabla 7.100	Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 5.	210
Tabla 7.101	Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 5.	211
Tabla 7.102	Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 5.	212
Tabla 7.103	Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 5.	213
Tabla 7.104	Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 1.	214
Tabla 7.105	Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 1.	215
Tabla 7.106	Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 1.	216

Tabla 7.107	Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 1.	217
Tabla 7.108	Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 3.	218
Tabla 7.109	Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 3.	219
Tabla 7.110	Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 3.	220
Tabla 7.111	Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 3.	221
Tabla 7.112	Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 4.	222
Tabla 7.113	Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 4.	223
Tabla 7.114	Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 4.	224
Tabla 7.115	Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 4.	225
Tabla 7.116	Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 6.	226
Tabla 7.117	Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 6.	227
Tabla 7.118	Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 6.	228
Tabla 7.119	Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 6.	229
Tabla 7.120	Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 7.	230
Tabla 7.121	Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 7.	231
Tabla 7.122	Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 7.	232
Tabla 7.123	Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 7.	233

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE AUTOBUSES: MODELACIÓN CFD Y VALIDACIÓN CON PROTOTIPOS A ESCALA”

Autores: Jorge Aníbal Manobanda Guangasi

Christian Omar Silva Villacrés

Tutor: Wladimir Eduardo Banda Barragán

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto tiene como objetivos analizar el comportamiento aerodinámico de autobuses interprovinciales en Ecuador tomando como referencia las dos carrocerías que más se comercializan en el país, y proponer alternativas a las carrocerías de estos autobuses que reduzcan su consumo energético y aumenten su estabilidad. El estudio se divide en dos partes: una numérica y una experimental.

El análisis numérico comprende la simulación de sistemas carrocería-viento y consta de siete etapas: 1) modelado geométrico en 2D de dos carrocerías de autobuses (modelos 1 y 2) por medio de un software CAD, 2) interpolación de las carrocerías seleccionadas en un dominio computacional y mallado de la grilla, 3) configuración de las condiciones iniciales y de borde del problema de Riemann, 4) calibración del esquema numérico con el problema de Von Karman y con geometrías ideales, 5) simulación con el software FLUENT de la interacción de las carrocerías con flujos de aire a distintas velocidades, 6) estudio de auto-convergencia numérica con modelos a diferentes resoluciones, y 7) post-procesamiento, análisis y visualización de los datos de salida.

Siguiendo el proceso anterior se estiman parámetros como el coeficiente de dragado, el coeficiente de sustentación, la presión, la vorticidad y el consumo de combustible para modelos de carrocerías con y sin llantas y con y sin esquemas $\kappa - \epsilon$ de turbulencia. Al comparar los resultados, se encuentra que: a) la frecuencia de desprendimiento de vórtices Von Karman coincide con la frecuencia referencial en un 1,78 %, b) la resolución estándar utilizada en las simulaciones de 72900 celdas asegura auto-convergencia en un 4,24 %, c) los coeficientes promedio de dragado y sustentación para el modelo 1 son $\sim 0,43$ y $\sim 0,00$, respectivamente, d) los coeficientes de dragado y sustentación para el modelo 2 son $\sim 0,48$ y $\sim -0,46$, respectivamente e) la inclusión de llantas en los modelos reduce el coeficiente de dragado para el modelo 1 en 51 % y para el modelo 2 en 15 %, f) la inclusión de modelos $\kappa - \epsilon$ de turbulencia induce laminaridad y estabilidad en el flujo, y g) el consumo de combustible en el modelo 1 es ~ 1 % mayor que en el modelo 2. El análisis experimental comprende la realización de ensayos aerodinámicos en un túnel de viento cerrado que pertenece al Laboratorio de Metrología del INAMHI. Los ensayos involucran sistemas carrocería-viento con prototipos a escala de autobuses y el análisis consta de cinco etapas: 1) modelado geométrico en 3D de las carrocerías seleccionadas por medio de un software CAD, 2) impresión 3D de prototipos a escala de las carrocerías y diseño del sistema de montaje, 3) ensayos experimentales en el túnel de viento de la

interacción entre los prototipos de autobuses y flujos de aire a distintas velocidades, 4) toma y registro de datos de parámetros de velocidad de flujo y presión por medio de un tubo Pitot, 5) visualización de las líneas de flujo usando cuerdas vibrantes.

Al final de este proceso se contrastan las velocidades, presiones, coeficientes de dragado y sustentación, y frecuencias de generación de vórtices obtenidas de las simulaciones numéricas correspondientes a modelos con llantas y turbulencia con sus contrapartes experimentales. Al comparar los resultados se encuentra que: a) las velocidades numéricas y experimentales tienen diferencias del orden de $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$, b) la diferencia en presiones es del orden de $\sim 100 \text{ [Pa]}$, c) la diferencia en los coeficientes de dragado numéricos y experimentales es del orden de 10% , d) la diferencia en la frecuencia de generación de vórtices es de 62% . Los datos experimentales y numéricos recabados tienen el mismo orden de magnitud, pero presentan diferencias globales mayor a 50% . Las diferencias encontradas entre ellos se atribuyen al control del entorno, al montaje de los sensores en la cámara de ensayos del túnel de viento, y a la precisión y condición metrológica de los instrumentos de medición al momento de realizar los ensayos.

Con el fin de reducir el consumo energético y aumentar la estabilidad de las carrocerías de autobuses se proponen dos modelos en base a consideraciones físicas e ingenieriles. En el primer modelo propuesto el coeficiente de dragado aumenta en un $\sim 11 \%$, mientras que el coeficiente de sustentación disminuye en un $\sim 100 \%$. Esto implica que el consumo energético en el primer modelo propuesto aumentaría el consumo energético, pero sería más estable. En el segundo modelo propuesto el coeficiente de dragado disminuye en $\sim 1.5 \%$, mientras que el coeficiente de sustentación aumenta en $\sim 5 \%$. Esto implica que el consumo energético en el segundo modelo propuesto disminuiría el consumo energético, sacrificando estabilidad. Como conclusión, este proyecto presenta dos alternativas de carrocerías para autobuses, que combinadas permitirían ahorrar en combustible y mejorar la estabilidad de las unidades de transporte.

TECHNICAL UNIVERSITY OF AMBATO
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND MECHANICS
MECHANICAL ENGINEERING CAREERS

“AERODYNAMICS BEHAVIOR ANALYSIS OF MODELS BUSES: MODELING CFD AND EXPERIMENTAL VALIDATION WITH SCALE PROTOTYPES”

ABSTRACT

This project has several goals, first to analyze the aerodynamic behavior of interprovincial buses in Ecuador, taking as reference the two marks (different manufacturers) that are most commercialized in the territory, and other goal is to propose alternatives to the bodies of these buses in a way that it is possible to reduce their energy consumption and increase their stability. The study is divided into two parts: a numerical part and an experimental part.

The numerical analysis includes the simulation of "body-wind" systems and consists of seven stages: 1) geometric modeling in 2D of two bus bodies (models 1 and 2) by means of a CAD software, 2) interpolation of the selected bodies in a computational domain and meshing of the grid, 3) configuration of the initial and edge conditions of Riemann's problem, 4) calibration of the numerical scheme with the Von Karman's problem and with ideal geometries, 5) simulation with the interaction software FLUENT of bodies with air flows at different speeds, 6) study of numerical self-convergence with models at different resolutions, and 7) post-processing, analysis and visualization of output data.

Following the process indicated (with 7 stages) it is possible to estimate parameters like drag coefficient, lift coefficient, pressure, vorticity and fuel consumption for body models with and without tires and with and without $\kappa - \epsilon$ turbulence schemes. When comparing the results, it is found that: a) the Von Karman vortex shedding frequency coincides with the referential frequency in a 1.78 %, b) the standard resolution used in the simulations of 72900 cells ensures auto-convergence in a 4.24 %, c) the average drag and lift coefficients for model 1 are ~ 0.43 and ~ 0.00 respectively, d) the average drag and lift coefficients for model 2 are ~ 0.48 and ~ -0.46 , respectively e) the inclusion of tires in the models reduces the drag coefficient for model 1 in 51 % and for model 2 in 15 %, f) the inclusion of $\kappa - \epsilon$ models turbulence induces laminarity and stability in the flow, and g) the consumption of fuel in model 1 is ~ 1 % larger than in model 2.

The experimental analysis includes the performance of aerodynamic tests in a closed wind tunnel that belongs to the INAMHI's Metrology Laboratory. The tests involve "body-wind" systems with scale bus prototypes and the analysis consists of five stages: 1) 3D geometric modeling of the selected bodies by means of a CAD software, 2) 3D printing of prototypes at the scale of the bodies and design of the assembly system, 3) experimental tests in the wind tunnel of the interaction between bus prototypes and air flows at different speeds, 4) taking and recording data of flow velocity and pressure parameters by means of a Pitot

tube, 5) visualization of the flow lines using vibrating ropes.

At the end of this process the speeds, pressures, dredging and lift coefficients, and vortex generation frequencies obtained from the numerical simulations corresponding to models with tires and turbulence with their experimental counterparts are contrasted. When comparing the results it is found that: a) the numerical and experimental velocities have differences of the order of $\sim 3\text{ m / s}$, b) the difference in pressures is of the order of 100 [Pa] , c) the difference in the coefficients of numerical and experimental dredging is of the order of 10% , d) the difference in the frequency of generation of vortices is $\sim 62\%$. The experimental and numerical data collected have the same order of magnitude, but present global differences mayor que 50% . The differences found between them (model 1 and model 2) are attributed to factors such as to the control of the environment, the assembly of sensor's camera of wind tunnel test, and the precision and metrological condition of the measuring instruments at the time of the tests.

With the goal to reduce energy consumption and increase the stability of bus' body (external body car), two models are proposed based on physical and engineering considerations. In the first proposed model the dredging coefficient increases by $\sim 11\%$, while the lift coefficient decreases by $\sim 100\%$. This implies that the energy consumption in the first proposed model would increase energy consumption, but it would be more stable. In the second proposed model the dredging coefficient decreases by $\sim 1.5\%$, while the lift coefficient increases by $\sim 5\%$. This implies that the energy consumption in the second proposed model would decrease energy consumption, sacrificing stability. As a conclusion, this project presents two alternatives of exterior design of bus' bodies cars, which combined would allow to save on fuel (diesel) and to improve the stability of the bus to transport of passengers.

CAPÍTULO I

1. ANTECEDENTES

1.1. TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE AUTOBUSES: MODELACIÓN CFD Y VALIDACIÓN CON PROTOTIPOS A ESCALA”.

1.2. ANTECEDENTES

La dinámica de fluidos es una rama de la física que está dentro de la mecánica de medios continuos y se encarga del estudio del movimiento de los fluidos y las fuerzas que lo provocan [44]. Para entender el comportamiento de gases, que son un tipo de fluidos, en distintos ambientes se han utilizado diversas técnicas empíricas y computacionales a lo largo de la historia. En el lado empírico, se utilizan ambientes controlados por sistemas mecánicos y electrónicos que permiten tomar medidas de variables termodinámicas como la presión, volumen, temperatura, velocidad de flujo, densidad, etc. En el lado computacional, se utilizan ambientes simulados que reproducen condiciones reales y que evolucionan de acuerdo a leyes de conservación de masa, momento, y energía.

Un problema de gran interés en la actualidad es el estudio de la aerodinámica de vehículos que se utilizan para transporte público [22] [32] [3] [25], y que cae dentro de un tema más general conocido como “problema viento-obstáculo”. Este problema ha sido ampliamente estudiado en el pasado, tanto en caso ideales con investigaciones del flujo que pasa a través de un cilindro conocido como el problema de Von Kármán [13] [42] [6] [45], como en casos reales donde se ubican modelos a escala de vehículos o partes de vehículos en túneles de viento reales o simulados [22] [25] [26] [41]. Hoy en día, un tema de trascendencia en dinámica de fluidos es, precisamente, el estudio de la aerodinámica de vehículos motorizados, ya que permite: 1) diseñar medios de transporte (e.g. aviones, cohetes, autobuses) y vehículos de competencia (e.g. autos y motocicletas de carreras) eficientes, 2) cuantificar el comportamiento de los vehículos a distintas velocidades, y 3) evaluar el rol del diseño vehicular en el consumo energético y en la seguridad de estos vehículos.

En el caso de simulaciones ideales se hallaron inicialmente soluciones numéricas para flujo viscoso constante sobre un cilindro, considerando casos con números de Reynolds menores a 300. Por ejemplo, se encontró que las oscilaciones sinusoidales transversales que se generan sobre un cilindro para un número de Reynolds de 100 con un método de vórtice viscoso de alta resolución presentan una amplitud sinusoidal de $A/D = 0,47$ (adimensional) y una frecuencia de desprendimiento de flujo de 0,156 [42]. Posteriormente, para entender la influencia del número de Reynolds y el desarrollo de turbulencia corriente abajo se consideraron modelos a números de Reynolds más elevados. Por ejemplo, Bishop, D. y Hassan, A. (1964) estudiaron el flujo a través de un cilindro para números de Reynolds en el rango de 3600 a 11000 y evaluaron la fuerza de dragado y la fuerza de sustentación a las que

está sujeta el cilindro [6]. Otro estudio encontró que la utilización de métodos de Newton no tiene efecto sobre las distribuciones de vorticidad en la superficie [13].

En el caso de simulaciones reales las empresas que fabrican autobuses diseñan carrocerías y autopartes en base a estudios aerodinámicos en ambientes generados artificialmente por computadora [40]. Los diseños enfatizan en optimizar aspectos como el consumo de combustible y la seguridad de los pasajeros [40]. El trabajo realizado por Krajnovic, Sinisa, Davidson, y Lars (2003) estudia modelos tipo autobús, basados en análisis tanto experimentales como numéricos del flujo promediado en el tiempo. Esta investigación demostró que el flujo instantáneo es diferente del flujo promedio tanto en la estela como a lo largo del vehículo, y también que el flujo cerca de los bordes laterales inferiores es altamente inestable. Por ello, concluyen que es difícil caracterizar la evolución numérica cuando el número de Reynolds es alto ($Re = 0,21 \times 10^6$) debido a las diferencias encontradas alrededor del modelo de autobús de prueba [20]. Otros estudios se han enfocado en la influencia de la resistencia del aire sobre los modelos de autobuses. Por ejemplo, Lajos, T. y Preszler, L. (1986) estudiaron el efecto que produce la deposición de lodo alrededor de un modelo de autobús, en base a experimentos en túneles de viento y simulaciones numéricas. Su estudio concluyó que el movimiento del suelo aumenta la velocidad de flujo debajo del autobús, dependiendo de parámetros como: la presión base y el retraso de flujo en la parte inferior de la carrocería, que provocan cambios en el flujo de salida a nivel del suelo [21]. Pese a lo anterior, los resultados no siempre son los esperados en ambientes reales porque las unidades de transporte público interprovincial están sujetas a distintas condiciones ambientales y a distintas carreteras dependiendo de la región en la que operan. En el caso de Ecuador, por ejemplo, los autobuses deben realizar viajes entre locaciones a nivel del mar y a alturas considerables, con condiciones ambientales no siempre ensayadas en la fase de diseño en laboratorio o por computadora. Por ello, surge la necesidad de estudiar la aerodinámica de estos autobuses numérica y experimentalmente, buscando proponer mejoras a su comportamiento aerodinámico. En este contexto, Mathuvel, A. y otros (2013), investigaron el efecto que se produce en la parte frontal de cuerpos sólidos rectangulares cercanos al suelo con el fin de reducir el coeficiente de dragado en modelos de autobuses. El diseño final mejorado solo modifica la forma del autobús en la parte frontal cuando el ángulo de orientación del flujo aire es 0° [32] y cuenta con esquinas redondeadas que producen un flujo de separación y circulación, reduciendo así la resistencia del aire en 4,5 % con un coeficiente de dragado $C_d = 0,21$. De igual manera, los estudios realizados por Siddhesh Kanekar y otros (2007) [36], Krajnovic, Sinisa y Davidson (2003) [20] sugieren modelos que mejoran el comportamiento aerodinámico de autobuses tipo interprovincial, pero los diseños propuestos no pueden aplicarse en Ecuador por contravenir la normativa vigente [33].

El enfoque de mejorar la eficiencia de los autobuses no está solo en la parte exterior, sino también en la parte interior del vehículo y en la comodidad del pasajero. Por ello, la investigación de Arun Raveendran y Sridhara (2007) evaluó tanto el diseño del exterior del autobús como la comodidad de los asientos. El diseño exterior fue evaluado con simulaciones en Ansys FLUENT, que sirvieron para cuantificar el rendimiento aerodinámico del

modelo original y el modificado, obteniendo una reducción de C_d de 0,53 a 0,29 a 100 kmh^{-1} . La comodidad de los asientos, por otro lado, fue evaluada realizando encuestas a una muestra de usuarios, quienes aprobaron el diseño final [36]. El presente trabajo está motivado por los estudios mencionados anteriormente, ya que resulta de gran interés científico e ingenieril para nosotros el tratar de entender la aerodinámica de vehículos utilizados como transporte de pasajeros en Ecuador. Por ello, en nuestro estudio analizamos numérica y experimentalmente dos modelos de autobuses comercializados y utilizados en Ecuador y posteriormente planteamos alternativas a las carrocerías de estos vehículos, que mejoren el rendimiento aerodinámico de los modelos originales dentro de la normativa vigente.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En el presente proyecto estudiaremos el comportamiento aerodinámico de autobuses, utilizando técnicas computacionales y experimentales modernas. De forma particular, este proyecto se centra en el análisis aerodinámico de autobuses interprovinciales en Ecuador.

Ecuador fabrica en los años 50, la primera carrocería metálica sobre un chasis con motor a gasolina. La provincia de Tungurahua es conocida por su especialización en manufactura, que abarca el 65 % del mercado a nivel nacional [9]. Los fabricantes en el Ecuador dedican recursos, como tiempo y dinero, a la realización de las pruebas aerodinámicas y al diseño de prototipos a escala para alcanzar una armonía entre estética e ingeniería [37], por lo que surge la necesidad de dotar a la industria automotriz de herramientas técnicas que permitan modificar los diseños de autopartes como: retrovisores, carrocería y bastidor, con el fin de reducir el coeficiente de arrastre, mejorar la estabilidad del vehículo, y estar así a la vanguardia de las carrocerías extranjeras [4].

En la mayoría de los casos un análisis aerodinámico de autobuses inicia con un estudio computacional a través de técnicas de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD,¹ por sus siglas en inglés). Los datos de estos estudios son comparados con diversos prototipos de autobuses inmersos en túneles de viento a escala, contrastando de esta manera herramientas numéricas con contrapartes experimentales [14]. En el Ecuador la inexistencia de un túnel de viento a escala real dificulta la realización de pruebas (e.g. de cargas estáticas y dinámicas, fuerzas presentes en su entorno) de autopartes, lo cual restringe la producción de autopartes eficientes desde el punto de vista aerodinámico [2].

Los laboratorios de túnel de viento a escala real son costosos en cuanto a diseño y construcción debido a la dificultad metrológica que se presenta al momento de controlar el viento que fluye a través de él, y al realizar mediciones de presión, velocidad, etc. [2]. Sin embargo, existen técnicas para realizar estudios aerodinámicos a bajo costo, que permiten obtener datos fiables que se asemejan a un comportamiento real. Dentro de ellas tenemos: modelización numérica de dinámica computacional de fluidos, y experimentación en túneles de viento a escala.

En lo referente a modelización CFD, actualmente existen varias herramientas numéricas que nos permiten predecir

¹ CFD = Computational Fluid Dynamics.

el comportamiento y fenomenología de los fluidos dinámicos, utilizando computación de alto rendimiento (HPC,² por sus siglas en inglés), lo que permite procesar datos de manera rápida y eficaz, y consecuentemente ahorrar tiempo y recursos económicos. Un paquete CFD contiene una colección de resolvers numéricos y algoritmos que permiten hallar soluciones a las ecuaciones de Navier-Stokes de la mecánica de fluidos dinámicos. Los resultados obtenidos predicen el comportamiento aerodinámico real y son verificados mediante comparaciones con resultados experimentales, e.g. con aquellos que provienen de túneles de viento u otros dispositivos a escala [31]. En lo referente a técnicas experimentales, los túneles de viento son herramientas físicas que permiten simular fenómenos aerodinámicos reales utilizando prototipos. Un túnel de viento a escala es un dispositivo pesado, costoso en el diseño y construcción [31], pero Ecuador cuenta con instituciones como: la Escuela Politécnica del Litoral, la Escuela Politécnica del Ejército y el Instituto de Meteorología e Hidrología (INAMHI), que disponen de túneles de viento a escala en sus laboratorios. En estos túneles de viento permiten obtener condiciones de flujo que se asemejan a la realidad [27].

Finalmente, desde el punto de vista social, se desconoce a ciencia cierta la relación entre los accidentes de tránsito en Ecuador y la aerodinámica de los autobuses interprovinciales. Ecuador tiene altos índices de fatalidades en las carreteras, ubicándose en el puesto 68 con una tasa de 20.1 % por encima de la tasa media de mortalidad de 18 % a nivel mundial en el año 2016 [17]. De acuerdo con la Agencia Nacional de Tránsito (ANT) los índices de accidentes en el Ecuador sobrepasan las 1300 víctimas fatales por accidentes de tránsito entre enero y julio de 2017 [1], en promedio 13 personas al día mueren en las vías, una de las causas principales es pérdida de pista con un 17.78 %. En este sentido el exceso de velocidad y la presencia de vientos fuertes en carreteras pueden ser peligrosos porque provocan pérdida de tracción y cierto grado de inestabilidad en el vehículo, cambiando su trayectoria y causando accidentes de tránsito. Por ello, este estudio buscará alternativas para disminuir el coeficiente de resistencia aerodinámica (C_d) y aumentar la estabilidad de los autobuses [38].

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Analizar el comportamiento aerodinámico de autobuses interprovinciales en Ecuador, mediante modelización CFD y su validación mediante prototipos a escala.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar los modelos geométricos de los autobuses interprovinciales mediante diseño asistido por computador.
- Importar los modelos geométricos en un dominio computacional que contenga un túnel de viento.

² HPC = High-performance computing.

- Simular la interacción entre el flujo de aire y los modelos geométricos para determinar el comportamiento aerodinámico de autobuses.
- Elaborar prototipos a escala para comparar el modelo CFD con datos experimentales mediante técnicas de visualización de flujo en un túnel de viento experimental.
- Plantear alternativas a la geometría de los autobuses para disminuir la resistencia aerodinámica y favorecer la estabilidad del autobús, basadas en los resultados computacionales.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1. ALCANCES

En esta sección se mencionarán los alcances que tendrá el presente estudio con el fin de cubrir los objetivos planteados.

- Seleccionar dos modelos representativos del universo de carrocerías utilizadas para los autobuses interprovinciales en Ecuador.
- Realizar el bosquejo de las geometrías 2D de modelos seleccionados, incluyendo las características intrínsecas de cada modelo, y también geometrías idealizadas de las carrocerías de autobuses.
- Calibrar los esquemas numéricos simulando modelos de referencia, como la calle de vórtices de Von Kármán, con el fin de entender la interacción entre flujos subsónicos y obstáculos a números de Reynolds específicos y distintos métodos de interpolación numérica.
- Realizar auto-convergencia en simulaciones del cilindro de Von Kármán para identificar el número de celdas apropiadas para obtener resultados con poca difusividad numérica.
- Realizar las simulaciones viento-carrocerías con los modelos idealizados y los modelos de las carrocerías tomadas para el estudio, con el fin de obtener datos que permitan estimar coeficiente y fuerza de dragado, y el coeficiente y fuerza de sustentación.
- Realizar las simulaciones para dos modelos de autobuses cambiando la velocidad del fluido a 90 km h^{-1} , 100 km h^{-1} y 120 km h^{-1} , velocidades consideradas dentro del rango moderado del reglamento de la Agencia Nacional de Tránsito [1].
- Comparar los resultados de los dos modelos a diferentes velocidades para evaluar el comportamiento aerodinámico que tienen a tiempos de simulación largos.
- Comparar los resultados de simulaciones numéricas mediante una análisis del comportamiento del flujo corriente arriba y corriente abajo sin considerar las llantas y considerando la presencia de llantas.

- Comparar los resultados de las simulaciones numéricas con esquemas de turbulencia y sin ellos, analizando las curvas aerodinámicas de los coeficientes de dragado y sustentación.
- Diseñar geometrías para las carrocerías y comparar el consumo de combustible en modelos con y sin modificaciones, en base consideraciones dinámicas y torques.
- Realizar un estudio experimental de la aerodinámica de autobuses comparando prototipos a escala de carrocerías con y sin modificaciones dentro de un túnel de viento, con el fin de contrastar su comportamiento aerodinámico en el rango moderado de velocidades.

1.5.2. LIMITACIONES

- Dentro del estudio numérico podemos mencionar a la falta de capacidad computacional para realizar un análisis en 3D de las carrocerías, ya que se trabaja con computadoras de 4 núcleos, con una memoria RAM de 6 GB. Para un análisis 3D se necesitan recursos supercomputacionales, y mayor capacidad de almacenamiento que la disponible para nuestro estudio 2D.
- Dentro del estudio experimental podemos mencionar a la falta de dinamómetros para la medición directa de fuerzas, al número reducido de sensores que se utilizan en los ensayos aerodinámicos, y a la carencia de una cámara fotográfica de alta velocidad.
- En ambos estudios, numérico y experimental, los modelos geométricos están basados en fotografías de las unidades de transporte y no se toman en consideración las fuerza de fricción y rodadura entre el vehículo y la superficie.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN

2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta sección introducimos varios conceptos básicos de fluidos y a sus respectivas propiedades físicas. Mencionamos los diferentes regímenes de flujo y explicamos como caracterizarlos. En el caso de la aerodinámica, mencionamos conceptos importantes para el estudio de la interacción entre un cuerpo y un fluido, que mantienen movimiento relativo. Por ello, introducimos las definiciones de la frecuencia de desprendimiento de vórtices que está ligada al número de Strouhal, las ecuaciones de Navier-Stokes y su respectiva demostración, y detallamos la aerodinámica automotriz y las fuerzas implicadas en el movimiento (arrastre y sustentación).

2.1.1. FLUIDO

Un fluido es un conjunto de partículas que permanecen unidas entre sí por fuerzas de cohesión o fuerzas de atracción débil entre moléculas [39]. Esta definición abarca a los líquidos y gases. Los fluidos se destacan por cambiar de forma sin que existan fuerzas restitutivas que tiendan a recuperar su forma original [39].

2.1.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

Los fluidos se clasifican de acuerdo a las características que poseen:

2.1.1.1.1. NEWTONIANOS

Un fluido newtoniano es una sustancia homogénea que se deforma constantemente en el tiempo. En otras palabras, es una sustancia que debido a su baja cohesión intermolecular, no tiene forma propia y adopta la forma del recipiente en este grupo están los líquidos de uso común como: agua, aceite, glicerina, etc [39].

Para la simulación tanto numérica como experimental que presentamos en esta tesis, asumimos que el fluido cumple con la característica del fluido newtoniano al considerar la viscosidad como constante bajo condiciones de referencia normalizadas a presión de 1 atmósfera y temperatura de 15 °C [46].

2.1.1.1.2. NO NEWTONIANOS

Un fluido no newtoniano es una sustancia cuya viscosidad varía con la fuerza de tensión que se le aplica, es decir, se deforma en la dirección de la fuerza que se aplique. En consecuencia, no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano. Dentro de este grupo están los asfaltos, la sangre, los coloides y geles [39]. Este caso no aplica para el fluido de nuestro análisis.

2.1.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos así como los demás materiales que tienen propiedades físicas, que cuales nos ayudan a estudiar su comportamiento, y a la vez distinguirlos de otros. A continuación, introducimos varios conceptos importantes que utilizaremos en nuestro estudio.

2.1.2.1. DENSIDAD

Por definición matemática, la densidad es una magnitud escalar concerniente a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. Mientras más unidas están las moléculas, el fluido es de mayor densidad. Esto es lógico ya que un fluido con más densidad, pesa más y por ende tiene mayor masa, al poseer más moléculas en un volumen constante. Se expresa como la masa (m) de un cuerpo dividida por el volumen (V) que ocupa [43].

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ = Densidad [kg m^{-3}]

m = Masa [kg]

V = Volumen [m^3]

2.1.2.2. VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad que cuantifica la resistencia opuesta a fuerzas cortantes. La viscosidad se debe fundamentalmente a las interacciones entre las moléculas del fluido, y se presenta cuando los fluidos están en movimiento [15].

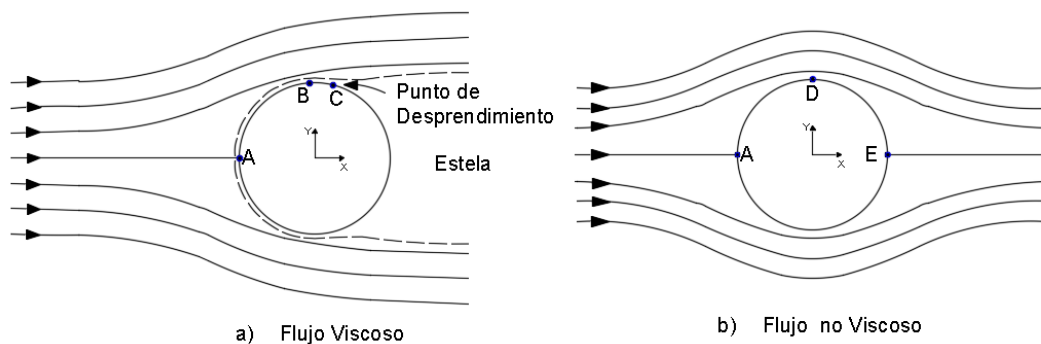


Figura 2.1: Viscosidad

Fuente: Los Autores

En la figura 2.1, se observa que un fluido viscoso, al atravesar un obstáculo, genera puntos de desprendimiento en la superficie, mientras que en el flujo no viscoso las moléculas siguen la trayectoria paralela a la capa límite sin que hayan desprendimientos.

2.1.2.2.1. VISCOSIDAD DINÁMICA

Cuando un fluido se mueve, formará en éste una tensión de corte cuyo valor depende de la viscosidad de dicho fluido. La tensión de corte, se representa con la letra griega τ (Tao), y se conoce como la fuerza necesaria para deslizar una capa de área unitaria sobre otra capa de la misma sustancia. Los gases, a diferencia de los líquidos aumentan su viscosidad con la temperatura. De igual manera, si aumenta la presión aumenta también la viscosidad [29].

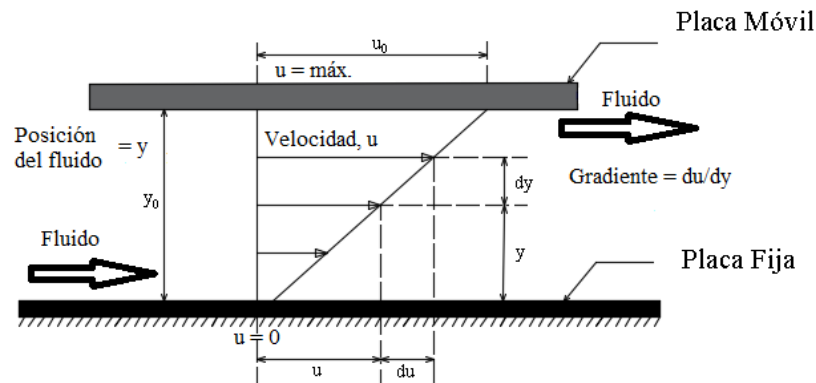


Figura 2.2: Viscosidad Dinámica (τ), velocidad (u) y posición del fluido (y).

Fuente: Los Autores

La figura 2.2 indica el comportamiento de la viscosidad de un fluido cuando se mueve, en donde una fuerza hace mover una delicada capa que está en contacto con el otro material, el uno fijo y el otro móvil en donde se observa la presencia de los diferenciales tanto de la velocidad como de la posición du y dy .

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

Donde:

τ = Tensión de Corte. [N m^{-2}]

μ = Viscosidad dinámica del fluido. [Ns m^{-2}]

du = Diferencial de Velocidad. [m s^{-1}]

dy = Diferencial de la Posición. [m]

2.1.2.2.2. VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Matemáticamente resulta de la división entre la viscosidad dinámica de un fluido y su respectiva densidad. En los gases la viscosidad cinemática varía notablemente con la presión y temperatura, mientras que en los líquidos varía solo con la temperatura [29].

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.3)$$

En donde:

ν = Viscosidad Cinemática. [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

μ = Viscosidad dinámica del fluido. [Ns m^{-2}]

ρ = Densidad. [kg m^{-3}]

2.1.3. NÚMERO DE REYNOLDS

En la mecánica de fluidos el número de Reynolds es un número adimensional que nos permite realizar una comparación entre los fenómenos que pueden generarse al transportar un fluido. De cierta manera determina un régimen con que fluye un fluido dentro de un entorno [28]. Este número se puede calcular de la siguiente manera: [19]

$$\text{Re} = \frac{Lv\rho}{\mu} \quad (2.4)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds [Adimensional]

L = Longitud característica [m]

v = Velocidad del fluido. [m s^{-1}]

ρ = Densidad. [kg m^{-3}]

μ = Viscosidad dinámica del fluido. [Ns m^{-2}]

De acuerdo a la definición anterior, el régimen de flujo puede considerarse como flujo laminar, flujo de transición y flujo turbulento. Explicamos a continuación la diferencia entre ellos.

2.1.3.1. FLUJO LAMINAR

Un flujo laminar se define como un flujo de partículas que se mueve en trayectorias paralelas, formando capas o láminas de manera uniforme y regular, conformando un flujo uniforme, estable y ordenado alrededor de un perfil.

Un fluido es considerado laminar $\text{Re} \leq 2000$ [19].

2.1.3.2. FLUJO DE TRANSICIÓN

En este tipo de régimen el fluido pierde la estabilidad para formar capas límites paralelas que pueden generar pequeñas oscilaciones con el tiempo, formando una delgada línea. El rango para este régimen es de $2000 \leq \text{Re} \leq 4000$ [19].

2.1.3.3. FLUJO TURBULENTO

Se conoce como flujo turbulento a aquel caracterizado por partículas con movimiento caótico donde las capas límites oscilantes se mueven de manera desordenada formando remolinos. Es decir, el flujo es no estacionario y tridimensional. El rango para considerar este régimen es $\text{Re} \geq 4000$ [19].

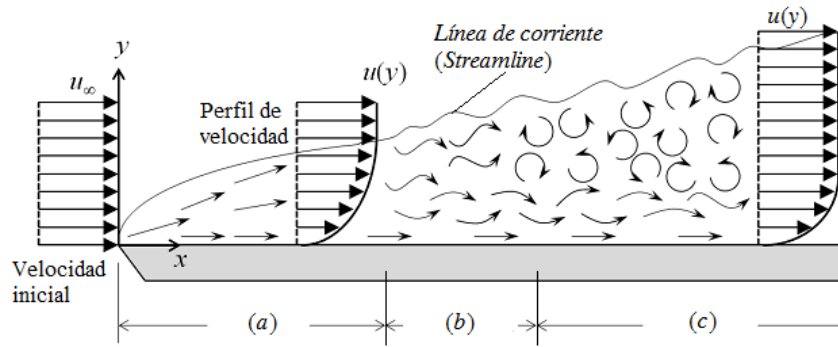


Figura 2.3: Flujo laminar (a), transición (b), turbulento (c), velocidad (u), eje horizontal (x) y eje vertical (y).

Fuente: Los Autores

Se observa en la figura 2.3 la representación de los 3 tipos de régimen de flujo existentes en un fluido. En primera instancia el perfil de velocidad del fluido golpea el borde anterior de la placa produciendo una capa límite laminar. Con el pasar del recorrido, se visualizan pequeñas oscilaciones caóticas convirtiéndolo en un flujo de transición, y finalmente cuando se incrementa el número de oscilaciones caóticas en la capa límite, el flujo comienza a pasar a la zona de turbulencia conocido como régimen turbulento.

2.1.4. CAPA LÍMITE

El flujo alrededor de la superficie de un cuerpo crea una capa delgada denominada capa límite, en la cual la velocidad presenta variaciones produciendo efectos viscosos. Estos efectos conocidos como esfuerzos cortantes se aprecian cuando las regiones tienen pronunciados gradientes de velocidad [4]. El resultado es un fluido que se separa de la frontera y crea una capa donde el fluido recircula, haciendo que la presión no aumente, y que permanezca relativamente baja en la zona posterior del cuerpo (zona de rarefacción). Sin embargo, en la parte delantera se crea una región de alta presión y ésta no se recupera. Como resultado, se crea una fuerza de arrastre en la dirección del flujo [22].

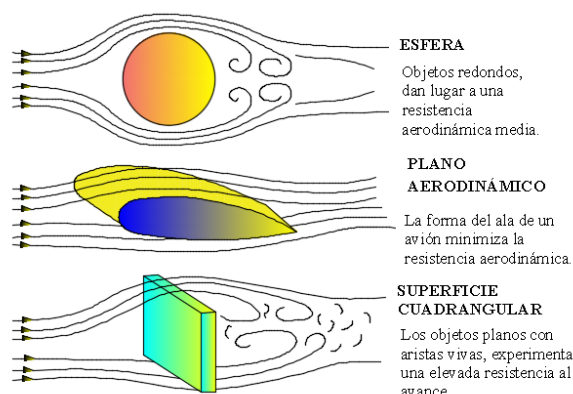


Figura 2.4: Capa límite sobre cuerpos

Fuente: Los Autores

En la figura 2.4 se muestra la capa límite para tres geometrías: una esfera, un ala de avión y una caja, donde se esboza cómo se crea una fina línea divisoria entre el objeto y el fluido.

2.1.4.1. CAUSAS Y EFECTOS DE LA CAPA LÍMITE

La capa límite nos permite analizar la variación de velocidades que se pueden generar en regiones de contacto entre el fluido y un cuerpo. La capa se forma debido a la viscosidad del fluido, produciendo de esta manera una variación en el movimiento de las líneas de corriente más cercanas al cuerpo. Estas variaciones de velocidades se convierten en variaciones de presión como indica el principio de Bernoulli (ver sección (2.1.5) más adelante), creando fuerzas de sustentación y de resistencia aerodinámica [4].

2.1.5. PRINCIPIO DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli formulada en 1738 es una representación matemática del principio de la conservación de la energía de un fluido en cualquier punto del recorrido. En su formulación original, considera un fluido circulando de modo estacionario a través de una sección que no es constante ni horizontal [28], y que presenta variaciones en la presión y velocidad de flujo de un punto a otro a lo largo de la sección de recorrido. Para que el fluido circule debe realizarse un trabajo. El trabajo neto es [28]:

$$W = (P_1 - P_2)\Delta V \quad (2.5)$$

Donde:

W = Trabajo neto [J]

P_1 = Presión en el punto 1 [Pa]

P_2 = Presión en el punto 2 [Pa]

ΔV = Variación de volumen entre punto 1 y 2 [m³]

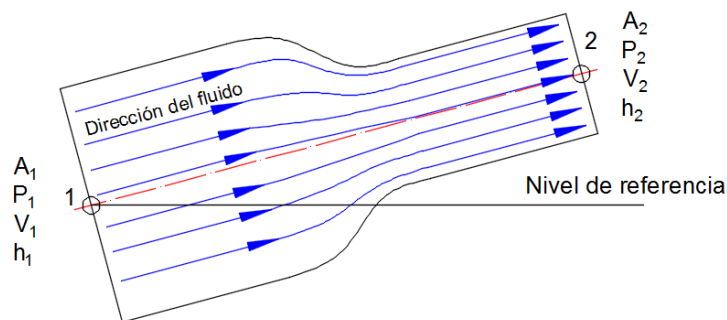


Figura 2.5: Conservación de energía. A_1 Sección 1, A_2 sección 2, P_1 presión en 1, P_2 presión en 2, v_1 velocidad en 1, v_2 Velocidad en 2, h_1 altura en 1 y h_2 altura en 2.

Fuente: Los Autores

La variación de trabajo es igual a:

$$\Delta W = \Delta U + \Delta K \quad (2.6)$$

Donde:

ΔU = Variación de energía potencial gravitacional [J]

ΔK = Variación de energía cinética [J]

Así tenemos:

$$\Delta U = \Delta mg(h_2 - h_1) \quad (2.7)$$

$$\Delta K = \frac{1}{2}\Delta m(v_2^2 - v_1^2) \quad (2.8)$$

Dando:

$$(P_1 - P_2)\Delta V = \Delta mg(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}\Delta m(v_2^2 - v_1^2)$$

Dividiendo cada término por ΔV y sabiendo que $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$, tenemos:

$$P_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = \text{constante} \quad (2.9)$$

Entonces la ecuación queda:

$$P + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{constante} \quad (2.10)$$

Donde:

P = Presión en la sección [Pa]

ρ = Densidad del fluido [kg m^{-3}]

h = Altura desde el nivel de referencia [m]

v = Velocidad del fluido [m s^{-1}]

g = Gravedad $g = 9,81$ [m s^{-2}]

2.1.6. ESTELA

La estela es una larga cola de viento turbulenta. Es un efecto de la variación de velocidad en una región espacial que tiene una velocidad de flujo relativamente baja y se ubica en la parte posterior del cuerpo, es decir, Tanto la región separada como la capa límite turbulenta dependen del tiempo [4]. En la estela se forman torbellinos que disipan grandes cantidades de energía y dan lugar a la pérdida de presión en el fluido.

2.1.7. SEPARACIÓN O DESPRENDIMIENTO

Este fenómeno ocurre cuando la corriente del flujo abandona el cuerpo y produce una región de flujo que la separa. El desprendimiento de la capa límite es un fenómeno indeseable desde el punto de vista del arrastre, ya que detrás del objeto se presentan zonas de presión baja, aumentando así el arrastre. Esta fricción está presente en todos los fluidos que tienen viscosidad y la manera de minimizar este efecto es disminuir el punto de desprendimiento del fluido con la capa límite [4].

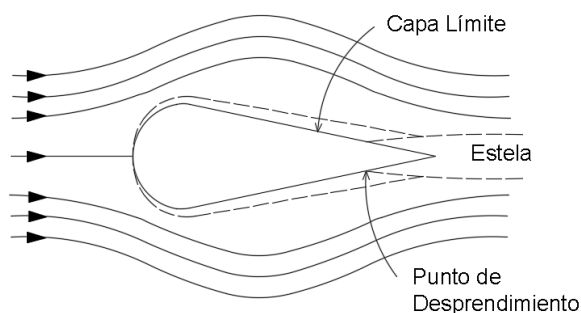


Figura 2.6: Estela y separación o desprendimiento

Fuente: [4]

La figura 2.6 muestra el punto de desprendimiento, que da origen a la formación de la estela. Los torbellinos al inicio son estacionarios pero a medida que crecen, cambian de tamaño con el tiempo, dando lugar a deformarse a un lado y al otro del cilindro, formando los llamados vórtices de Von Karman [4]. Un ejemplo de este fenómeno lo constituye el sonido retumbante proveniente de los vórtices o puntos de desprendimiento cuando el viento golpea a cables aéreos de electricidad.

2.1.8. VORTICIDAD

La vorticidad es una magnitud vectorial utilizada en la mecánica de fluidos, que se define como el rotacional del campo de velocidades. La rotación de las partículas fluidas puede generar o no, una deformación transversal. Además, caracteriza a la rotación que experimenta el fluido, es decir, puede ser solenoidal si gira en círculo o helicoidal, si rota en un eje. Así cualquier tipo de flujo que posee vorticidad tiene trayectoria de corrientes cerradas [20].

La vorticidad se define como:

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{v} \quad (2.11)$$

Donde:

$\vec{\omega}$ = Vorticidad

$\vec{\nabla}$ = Operador nabla

\vec{v} = Campo de Velocidades

2.1.9. NÚMERO DE STROUHAL

El número de Strouhal S_r es un parámetro adimensional y fundamental en mecánica de fluidos que nos describe el comportamiento oscilatorio de un flujo [45]. Además, se debe tomar en cuenta que S_r está en función del número de Reynolds. Se puede definir como:

$$S_r = f \frac{L}{v} \quad (2.12)$$

Donde:

S_r = Número de Strouhal [Adimensional]

f = Frecuencia de desprendimiento de vórtices [Hz]

L = Longitud Característica [m]

v = Velocidad del flujo [$m s^{-1}$]

Otra forma de calcular el número de Strouhal en función del Número de Reynolds (Re) introducida por C.H.K. Williamson, parte de relaciones semi-empíricas y la ecuación 2.13, [45], está definida como:

$$Sr = 0,2731 - \frac{1,1129}{\sqrt{Re}} + \frac{0,4821}{Re} \quad (2.13)$$

2.1.10. FRECUENCIA DE DESPRENDIMIENTO DE VÓRTICES

Este fenómeno es también conocido como Vibración Inducida por Vórtices VIV³ por su siglas en inglés. Son vórtices que se forman cuando un flujo pasa sobre un cuerpo, este fenómeno se puede observar desde un cierto rango de Reynolds y están asociados a zonas de baja presión, perturbaciones donde se desprenden de forma alternativa y periódica, formando lo que se denomina calle de vórtices de Von Karman [45].

2.1.11. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La dinámica de fluidos computacional CFD es un conjunto de técnicas numéricas y computaciones que permiten predecir el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, reacciones químicas y otros fenómenos relacionados [12]. Los resolvedores de CFD constituyen un conjunto complejo de algoritmos usados para modelar y simular el flujo de fluidos. Para predecir dichos fenómenos, CFD resuelve ecuaciones de la conservación de la masa, de momento, de energía y cierra el sistema con la ecuación de estado.

En CFD, el dominio computacional de interés consiste en un conjunto de celdas o volúmenes de control. En cada celda, las ecuaciones diferenciales parciales se reescribirán como ecuaciones algebraicas que relacionan la velocidad, la presión, la temperatura, el momento lineal, la energía y viscosidad. El conjunto de ecuaciones se resuelven de manera iterativa, arrojando una descripción completa del flujo en toda la superficie o volumen de control.

2.1.12. ECUACIONES DE NAVIER-STOKES

La raíz de CFD está relacionado con las ecuaciones de Navier-Stokes, que es un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el flujo de fluidos con modelos matemáticos utilizados para analizar el movimiento de los fluidos viscosos. Estas ecuaciones llevan consigo fenómenos muy difíciles de resolver analíticamente como el flujo turbulento. Las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S) son[16]:

³ Vortex Induced Vibrations

- La ecuación de la conservación de la masa o ecuación de continuidad (ecuación (2.14))
- La ecuación de la conservación del momento cinético o de la cantidad de movimiento (ecuación (2.15))
- La ecuación de la conservación de la energía (ecuación (2.16))

Para el caso de fluidos newtonianos compresibles, las ecuaciones se expresan como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.14)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.15)$$

$$\rho \left(\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j H) \right) = \frac{\partial}{\partial t}(u_i \tau_{ij}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (2.16)$$

En estas ecuaciones ρ representa la densidad, u_i las componentes cartesianas de la velocidad en la dirección x_i ($i = 1, 2, 3$) y los subíndices repetidos indican sumatorio para dicho índice, P la presión del fluido, τ_{ij} las componentes del tensor de esfuerzos viscosos, E la energía total, H la entalpía total, k es el coeficiente de conductividad térmica, y T la temperatura absoluta.

La divergencia de la velocidad no es considerada para flujos incompresibles, y las componentes del tensor de deformación vienen dadas por:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.17)$$

El tensor de rotación se define como:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.18)$$

La energía total E y la entalpía total H son obtenidas a partir de las siguientes expresiones:

$$E = e + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (2.19)$$

$$H = h + \frac{1}{2} u_i u_i \quad (2.20)$$

En estas ecuaciones e corresponde a la energía por unidad de masa, y h es la entalpía por unidad de masa [30]. Las ecuaciones para flujos incompresibles se simplifican en la forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = k \nabla^2 T \quad (2.23)$$

Para estas ecuaciones $\nu = \mu/\rho$ es la viscosidad cinemática, μ la viscosidad dinámica, y ∇^2 el operador de Laplace [30].

2.1.13. ECUACIONES DE EULER

Las ecuaciones de Euler, son aplicadas para la dinámica de fluidos, permiten describir el movimiento de un fluido compresible no viscoso. Son expresiones de las ecuaciones de N-S cuando las disipaciones son despreciables frente a las convectivas [16], estas ecuaciones son:

- La ecuación de la conservación de la masa o ecuación de la continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho v] = 0 \quad (2.24)$$

- La ecuación de la conservación del momento lineal.

$$\frac{\partial [\rho v]}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho v v + IP] = 0 \quad (2.25)$$

- La ecuación de la conservación de la energía.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + P)v] = 0 \quad (2.26)$$

- La ecuación de estado del gas ideal.

$$P = (\gamma - 1)\rho\varepsilon \quad (2.27)$$

Para las ecuaciones ρ es la densidad del fluido, ∇ un operador diferencial vectorial, E energía total, P la presión del fluido, $\gamma = C_p/C_v$ el coeficiente politrópico, C_p calor específico a presión constante, C_v calor específico a volumen constante, ε la energía interna por unidad de masa, y v la velocidad del fluido [16].

2.1.14. MODELOS DE TURBULENCIA

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido no presentan dificultad cuando el flujo es laminar o no viscoso. Sin embargo, cuando el flujo es turbulento, presenta serios problemas [11]. La turbulencia es causada por gradientes de velocidad media que generan inestabilidades. El proceso de turbulencia para disipar la energía turbulenta se describe en la figura 2.7.

En la práctica de ingeniería la mayoría de los fluidos son turbulentos están caracterizados por: ser inestables, tridimensionales, y una vorticidad [11].

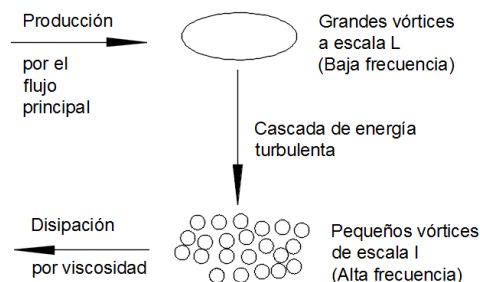


Figura 2.7: Descripción del proceso de generación y dispersión de turbulencia.

Fuente: Los Autores

Los principales modelos de turbulencia se clasifican en:

2.1.14.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA DNS⁴

Este método permite la completa solución de las ecuaciones de Navier-Stokes sin tener problemas con altos números de Reynolds, pues el método es preciso al resolver pequeñas y grandes escalas de movimiento. Sin embargo, las supercomputadoras y clusters actuales solo pueden resolver flujos simples a números Reynolds moderados [11].

2.1.14.2. SIMULACIÓN GRANDES REMOLINOS LES⁵

La simulación de flujo turbulento es compleja, depende del tiempo y a números altos de Reynolds es prácticamente imposible. Sin embargo, el método LES aproxima los efectos de grandes escalas de turbulencia a pequeñas escalas, siendo una alternativa más económica computacionalmente hablando que el método DNS[11].

Los métodos simples de aproximación para las pequeñas escalas son: la longitud de mezcla (proporcional al tamaño de la malla), y el modelo de Smagorinski[11].

2.1.14.3. PROMEDIADO DE REYNOLDS DE LAS ECUACIONES DE N-S RANS⁶

Este método fue propuesto por Reynolds en 1895, y está basado en la descomposición de las variables de flujo en un valor medio y otro fluctuante[11]. Los modelos propuestos para cerrar las ecuaciones RANS se dividen en ecuaciones de cierre de primer y segundo orden[18]. Los métodos de primer orden se dividen en modelos de ninguna, una o múltiples ecuaciones para cerrar las ecuaciones RANS[11]. Dentro de ellos tenemos:

- Modelo con ninguna ecuación: Modelos de viscosidad turbulenta constante, y Modelos de longitud de mezcla, donde la longitud característica del tamaño de los torbellinos (l_o) se define algebraicamente y el valor de referencia de la magnitud de fluctuaciones turbulentas (u_o) a partir de los flujos medios.
- Modelos con una ecuación: En este modelo l_o se define algebraicamente y se utiliza una ecuación de transporte para obtener u_o .
- Modelos de dos ecuaciones: En un primer caso se usan ecuaciones de transporte para obtener l_o y u_o , y el modelo particular $\kappa - \epsilon$.

La figura 2.8 explica la complejidad que tienen los modelos de turbulencia para la aplicación en la dinámica de fluidos.

⁴ Direct Numerical Simulation ⁵ Large Eddy Simulation ⁶ Reynolds Averaged Navier Stokes

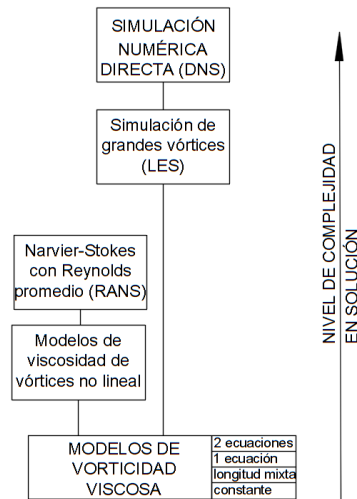


Figura 2.8: Nivel de complejidad de modelos de turbulencia.

Fuente: Los Autores

2.1.14.4. MODELO DE TURBULENCIA $\kappa - \epsilon$

Las ecuaciones RANS son ecuaciones de transporte para velocidades medias $\overline{u_i}$ y variables escalares $\overline{\phi}$, a través de los flujos turbulentos. Por ello el esfuerzo de Reynolds es:

$$\text{Esfuerzo Reynolds} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (2.28)$$

Matemáticamente cualquier componente del momento principal de cada esfuerzo de Reynolds, puede satisfacer su propia ecuación de transporte escalar, y está compuesto por[11]:

Un término de producción, P_{ij} , dado por el gradiente de velocidades medias.

Un término de disipación, ϵ_{ij} , se genera por la viscosidad actualizada sobre los gradientes de velocidades fluctuantes.

Un término de redistribución, Φ_{ij} , ayuda a transferir la energía a través de la presión y/o fluctuaciones de la corriente fluida.

De esta manera, podemos expresar la ecuación de transporte turbulento como:

$$\text{Energía neta} = \text{Producción} + \text{Redistribución} - \text{Disipación}$$

Además, existen términos convectivos y difusivos que son transportados con el flujo de un punto a otro del dominio. Esto lo convierte en el modelo de turbulencia más usado a nivel industrial que consiste en dos ecuaciones para viscosidad turbulenta[11]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.29)$$

Donde C_μ es una constante, k es la energía cinética turbulenta y ϵ es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, y las ecuaciones de transporte para $(\kappa - \epsilon)$ son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i k - \Gamma^{(k)} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = \rho (P^{(k)} - \varepsilon) \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho U_i \varepsilon - \Gamma^{(\varepsilon)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \rho (C_{\varepsilon 1} P^{(k)} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k}$$

Ahora las difusividades de $\kappa - \varepsilon$ basadas en viscosidades moleculares y turbulentas:

$$\Gamma^{(k)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.31)$$

$$\Gamma^{(\varepsilon)} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$$

Launder y Spalding en 1974, en un modelo estándar definieron las constantes como: $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1$ y $\sigma_\varepsilon = 1,30$ [23].

2.1.15. ENFOQUE DE DISCRETIZACIÓN

Los enfoques de discretización para resolver los fenómenos de dinámica de fluidos, permiten trabajar con el dominio computacional formado por una grilla estructura o no estructurada. Dentro de ellos tenemos [11]:

- Método de diferencias finitas: Introducido por Euler en el siglo 18, usado para geometrías simples, y puede aplicarse a cualquier tipo de grilla [11].
- Método de volúmenes finitos: El método usa las ecuaciones de conservación como un punto de partida, y puede ser aplicado a geometrías complejas [11].
- Método de elementos finitos: El métodos es similar al de volúmenes finitos en cualquier manera, dividiendo en volúmenes discretos o elementos finitos, la grilla puede ser no estructurada [11].

2.1.15.1. MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

El método más utilizado en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) está basado en volúmenes finitos[34]. El discretizado de las ecuaciones equivale a dividir el dominio en volúmenes de control. Esto lleva consigo integrar las ecuaciones cada volumen, aplicando el teorema de divergencia con el objetivo de transformar las integrales de volumen en integrales de superficie [18],[34]. Existen dos formas de aplicar los volúmenes finitos:

- Método de los volúmenes finitos centrado en las celdas.

En el método de volúmenes finitos centrado en las celdas, las celdas están directamente relacionadas con los volúmenes de control que abarcan soluciones desconocidas.

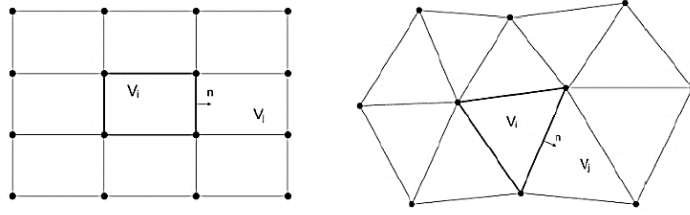


Figura 2.9: Método de los volúmenes finitos centrado en las celdas.

Fuente: [18]

- Método de los volúmenes finitos centrado en los vértices.

En el método de volúmenes finitos centrado en los vértices, los volúmenes dan origen a un doble geometría de celdas complejas, donde las soluciones se almacenan en la base por vértice.

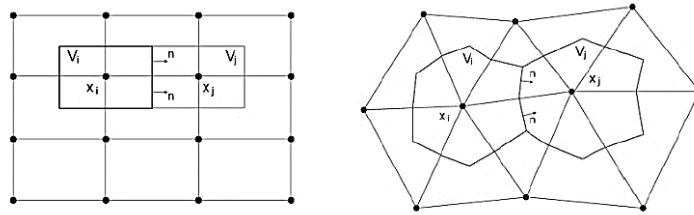


Figura 2.10: Método de los volúmenes finitos centrado en los vértices.

Fuente: [18]

2.1.15.1.1. ECUACIÓN DE SEMI-DISCRETIZACIÓN

En el método de volúmenes finitos el primer paso es el proceso de discretización donde las ecuaciones que gobiernan el dominio se integran sobre los volúmenes finitos en que se han dividido el dominio, y luego con el teorema de Gauss transformar las integrales de volumen de los términos de convección y difusión en integrales de superficie [30]. La ecuación para una variable escalar general ϕ será:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial y}}_{\text{tér. transitorio}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho v \phi)}_{\text{tér. de convección}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi)}_{\text{tér. de difusión}} + \underbrace{Q^\phi}_{\text{tér. fuente}} \quad (2.32)$$

La forma de estado transitorio de la ecuación (2.32) está dada por[30]:

$$\nabla \cdot (\rho v \phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi) + Q^\phi \quad (2.33)$$

Integrando la ecuación sobre un elemento c del dominio tendremos:

$$\int_{V_c} \nabla \cdot (\rho v \phi) dV = \int_{V_c} \nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi) dV + \int_{V_c} Q^\phi dV \quad (2.34)$$

2.1.15.1.2. MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

Para interpolar las soluciones en la grilla, existen varios métodos que mencionamos a continuación:

- Interpolación lineal
- Interpolación UPWIND
- Interpolación QUICK

Interpolación lineal

Es una aproximación lineal directa entre los dos nodos más cercanos para la solución de cada volumen de control[11].

Interpolación UPWIND (UDS⁷)

La interpolación upwind permite aproximar el valor de las variables en la cara de un volumen de control, y está dada por[11]:

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_{pif}(u \otimes n)_e > 0 \\ \phi_{Eif}(u \otimes n)_e > 0 \end{cases} \quad (2.35)$$

Donde ϕ_e es una aproximación equivalente evaluada en un nodo corriente arriba [11]. El uso de la aproximación de diferencia finita hacia atrás o hacia adelante, depende de la corriente de flujo, y del coeficiente de difusión numérica.

$$\Gamma_e^{num} = (\rho u)_e \Delta x / 2 \quad (2.36)$$

Dentro del estudio, el método de interpolación UPWIND fue usado para las soluciones de la grilla de los diferentes modelos.

Interpolación QUICK

El esquema cuadrático de interpolación de viento puede ser derivado usando un ajuste polimomial con una grilla cartesiana uniforme[11]:

$$\phi_e = \frac{6}{8}\phi_U + \frac{3}{8}\phi_D - \frac{1}{8}\phi_{UU} \quad (2.37)$$

Siendo ϕ_e una aproximación equivalente evaluada en un nodo de corriente arriba, D, U y UU la corriente del flujo, corriente abajo, arriba y abajo, respectivamente. Esto dependerá de la dirección del flujo[11]. El esquema de interpolación cuadrática tiene tres errores de truncamiento cuando la grilla es uniforme y no uniforme, siendo propenso a oscilaciones [11].

2.1.15.1.3. ALGORITMOS DE ACOUPLE PRESIÓN-VELOCIDAD

Los algoritmos de acople presión-velocidad sirven para flujos constantes, usados para resolver problemas de dinámica de fluidos computacionales [30]. Su objetivo es obtener la solución para las ecuaciones vinculadas a la presión de la grilla escalonada básica, dentro de ellos tenemos:

⁷ Upwind differencing scheme

- Algoritmo SIMPLE
- Algoritmo SIMPLEC
- Algoritmo PISO

Algoritmo SIMPLE

Su acrónimo es método semi-implícito permite encontrar la solución de forma iterativa generando campos de presión y velocidad, usado para flujos en dos dimensiones, satisfaciendo las ecuaciones de conservación de masa y momento en cada iteración [30].

Algoritmo SIMPLEC

El método es similar a SIMPLE diferenciándose al usar las ecuaciones de momento en las de corrección de velocidad y con ello omitir términos menos significativos [30]:

Algoritmo PISO⁸

El algoritmo PISO fue propuesto por Issa en 1986. No presenta iteraciones y con grandes pasos de tiempo, lo que resulta en un menor consumo computacional. PISO es un procedimiento de cálculo de presión-velocidad y se ha adaptado de manera perfecta a problemas de estado estacionario[30].

Este método implica un paso de predictor y dos de corrector y permite satisfacer la conservación de masa usando pasos de predictor-corrector al mismo tiempo[30].

El procedimiento que realiza el algoritmo se puede resumir de la siguiente forma [11]:

1. Establece las condiciones iniciales del dominio.
2. Resuelve la ecuación de conservación de momento lineal discretizado para calcular un campo de velocidad intermedia.
3. Calcula los flujos de masa en las caras de las celdas.
4. Resuelve la ecuación de presión.
5. Corrige los flujos de masa en las caras de las celdas.
6. Corrige las velocidades en función del nuevo campo de presión.
7. Actualiza las condiciones contorno.
8. Repite desde el paso 3 para la cantidad de veces establecidas en la configuración.
9. Aumenta el paso de tiempo y repite desde el paso 1.

A continuación se detalla el paso predictor y corrector del algoritmo.

Paso del predictor

⁸ Presión Implícita con la División de Operadores

Este paso trata de adivinar un campo de presión p^* y obtener componentes del campo de velocidad u^* y v^* con ayuda de la ecuación de conservación de momento lineal discretizado. Esta conjetura inicial de presión en algunos casos puede ser o no la correcta [30].

Paso corrector 1

Las componentes de velocidad obtenidas con el paso predictor podrían no ser las correctas y no satisfacer la ecuación de continuidad. Por ello el algoritmo define otros factores de corrección denominados como: p' , u' , v' para el campo de presión y velocidad respectivamente. Luego resuelve la ecuación de momento insertado en el campo de presión corrector p^{**} y obtener las componentes de velocidad correctas u^{**} y v^{**} [30].

Las ecuaciones son:

$$p' = p^{**} - p^*$$

$$v' = v^{**} - v^*$$

$$u' = u^{**} - u^*$$

Una vez encontrada la presión corregida p' y las componentes de velocidad corregidas v' y u' . PISO puede usar otro paso corrector 2, y se lo calcula de la siguiente forma:

$$p^{***} = p^{**} + p'' ; p'' = p^* + p'$$

$$v^{***} = v^{**} + v'' ; v'' = v^* + v'$$

$$u^{***} = u^{**} + u'' ; u'' = u^* + u'$$

Donde: p^{***} , v^{***} y u^{***} son las correcciones del campo de presión y velocidad respectivamente, y p'' , v'' y u'' son las segundas correcciones del campo de presión y velocidad. Finalmente $p = p^{***}$, $v = v^{***}$ y $u = u^{***}$, donde: p , v y u son establecidas como el campo de presión y velocidad correcta para repetir el proceso.

Las ventajas son: el menor consumo computacional, el tiempo de paso laminar hacia atrás de PISO es menor a SIMPLE, y sus esquemas numéricos adecuados para resolver la relación de presión-velocidad. Por ello PISO es el algoritmo utilizado para el estudio.

2.1.16. AERODINÁMICA AUTOMOTRIZ

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que se encarga de estudiar el movimiento relativo entre un sólido y el fluido del aire u otros fluidos gaseosos, así como de las diferentes fuerzas que dichos fluidos soportan y producen. Todo objeto que se mueva en un fluido lo hará en contra de la resistencia de ese fluido. Algunos ejemplos de estudios aerodinámicos pueden ser el movimiento de una aeronave, la carga de viento en una estructura, el estudio de la resistencia aerodinámica de autobuses.

Una de las leyes físicas que describen el movimiento de los fluidos es el Teorema de Bernouilli. Este teorema relaciona un aumento de la velocidad del flujo con una reducción de la presión y viceversa [7] (ver ecuación (2.9)).

2.1.17. FUERZAS IMPLICADAS

Las fuerzas aerodinámicas a las que se ven expuestos los vehículos inmersos en fluidos son: sustentación, resistencia, fuerzas laterales y momento. Todas estas fuerzas influyen en el consumo de combustible, eficiencia e incluso estética del automóvil. Es así que por ejemplo un coche de competición se diseña con sustentación negativa, elevada eficiencia, en cambio un bus normal se sigue bajo parámetros durante el proceso de diseño como consumo, funcionalidad, seguridad y estética [7].

2.1.17.1. FUERZA DE SUSTENTACIÓN

Es la fuerza desarrollada en un perfil aerodinámico que se mueve en el aire, y surge de abajo hacia arriba. La fuerza de sustentación es de dirección perpendicular a la velocidad del flujo de aire, si este posee un ángulo de ataque, la fuerza cumple con la relación de perpendicularidad [22].

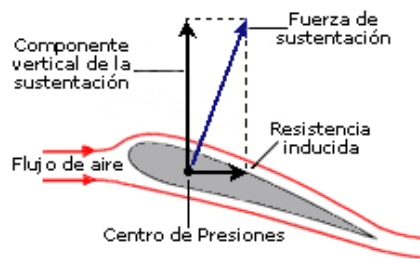


Figura 2.11: Fuerza de Sustentación
Fuente: [22]

Su fórmula es:

$$F_l = \frac{1}{2} C_l \rho v^2 A \quad (2.38)$$

Donde:

F_l = Fuerza de sustentación [N]

A = Superficie que produce la sustentación (e.g. hélice, mano, ala) [m^2]

C_l = Coeficiente de sustentación [adimensional]

ρ = Densidad del fluido [$kg\ m^{-3}$]

v = Velocidad del fluido [$m\ s^{-1}$]

2.1.17.2. RESISTENCIA AERODINÁMICA (ARRASTRE)

La fuerza de resistencia que se opone al avance de un autobús se debe, a la resistencia a la rodadura y a la resistencia aerodinámica. Esta resistencia es por lo general de sentido contrario a la velocidad.

La resistencia aerodinámica se presenta como una fuerza, F_d , que se expresa en forma del coeficiente de dragado.

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho v^2 A} \quad (2.39)$$

Donde:

C_d = Coeficiente de dragado [adimensional]

F_d = Resistencia al avance o dragado [N]

ρ = Densidad del fluido [kg m^{-3}]

v = Velocidad del fluido [m s^{-1}]

A = Superficie frontal perpendicular al movimiento del fluido. [m^2]

Tanto, la sustentación como la resistencia al avance se combinan entre sí como vectores para dar como resultado la fuerza aerodinámica. Estudios realizados[25],[26],[41] manifiestan que cuanto menor sea el C_d , menor es la potencia empleada por el motor lo que permite vencer la resistencia al avance, en pocas palabras ésto ocasiona un menor consumo de combustible[41].

2.2. HIPÓTESIS

El análisis y planteamiento de distintas alternativas de modelos geométricos para autobuses permitiría encontrar modelos que disminuyan la resistencia aerodinámica, y permitan obtener una mayor eficiencia aerodinámica y mayor estabilidad.

2.2.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Resistencia aerodinámica de autobuses.

2.2.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Alternativas de la geometría de autobuses.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se especifica la metodología que se utilizó para el presente trabajo de investigación y presenta una descripción de los pasos necesarios para calibrar el método numérico y aplicarlo posteriormente en el análisis de prototipos de los autobuses que son objeto de estudio. Estos pasos son: nivel o tipo de investigación, población y muestra, operacionalización de variables, y el plan de recolección de datos.

3.1. NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. INVESTIGACIÓN NUMÉRICA

La primera parte de la investigación es teórica, y pretende aplicar los fenómenos, conceptos, y demostraciones de las ecuaciones de Navier Stokes que lleva implícito el software de Ingeniería Asistido por Computador (CAE,⁹ por sus siglas en inglés). Mediante la aplicabilidad de las leyes que rigen el comportamiento aerodinámico.

El análisis numérico comprende la simulación de sistemas carrocerías-viento en el software Ansys Fluent, código comercial de dinámica de fluidos computacional usado para evaluar el rendimiento aerodinámico, y su postprocesamiento en el software VisIt 2.13.2 y análisis de datos mediante Gnuplot.

3.1.1.1. SOFTWARE

El término software fue usado por primera vez por Tukey, John en 1957 [35], y es un soporte lógico de un sistema informático que permiten realizar tareas específicas mediante un conjunto código de fuente, binario y ejecutable.

El uso de software para el preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento de los resultados ayudaron a desarrollar esta tesis. El software utilizado incluye: AutoCAD versión 19 estudiantil, ANSYS Fluent versión 18.2 estudiantil, VisIt versión 2.13.1 libre, Gnuplot versión 5.2, y Látex.

3.1.1.1.1. AutoCAD

AutoCAD v19 es una herramienta de Diseño Asistido por Computadora (CAD,¹⁰ por sus siglas en inglés) que permite dar crear diseños, y generar geometrías con facilidad.

3.1.1.1.2. ANSYS Fluent

ANSYS Fluent v18.2 es una herramienta de dinámica de fluidos computacional disponible en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica que permite prescribir condiciones de borde e iniciales para problemas de Reimann.

⁹ Computer Aided Engineering ¹⁰ Computer Asistent Design

ANSYS Fluent optimiza el rendimiento, entregando resultados rápidos y precisos para una amplia gama de aplicaciones en CFD y en problemas de multifísica.

Permite modelar flujos, turbulencia, transferencia de calor y reacciones químicas para aplicaciones industriales, cubriendo combustión dentro de cilindros, aeroacústica, turbomáquinas y sistemas multifásicos.

3.1.1.1.3. VisIt

VisIt v2.13.1 es una herramienta de código abierto que permite la visualización, animación y análisis de datos que provienen de simulaciones numéricas. Está disponible para procesamiento de información con un amplio conjunto de funciones y permite visualizar campos escalares, vectoriales en cualquier tipo de grilla estructurada en 2D y 3D [8].

3.1.1.1.4. Gnuplot

Gnuplot v5.2 es una herramienta gráfica de código abierto que usa líneas de comandos, permitiendo a científicos y estudiantes visualizar funciones matemáticas y datos de forma interactiva [47].

3.1.1.1.5. Látex

Látex es un editor de texto que se utiliza para la creación de documentos científicos. Látex permite dar la estructura que desee el usuario, y se utiliza en la preparación y publicación de libros y artículos que contienen texto y ecuaciones multilingües complejos.

3.1.2. INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

La segunda parte de la investigación es experimental, y comprende en la realización de ensayos aerodinámicos en un túnel de viento cerrado e involucran sistemas carrocería-viento con prototipos a escala.

Los ensayos permiten la toma y registro de datos de parámetros de velocidad de flujo y presión. Con ello contrastar con los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones.

Se simularon bajo condiciones reales el efecto que ocasiona el viento en la geometría del autobús en el túnel de viento del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) este instrumento permite variar la velocidad en un rango de 0 a 60 m s^{-1} para calibrar anemómetros. Verifica el correcto funcionamiento de los sensores de velocidad de viento, este equipo garantiza uniformidad de flujo, velocidad y propiedades del aire, dicho túnel tiene turbulencias menores al 2% y una variación de velocidad promedio de $\pm 2 \text{ m s}^{-1}$.



Figura 3.12: Túnel de viento cerrado del INAMHI

Fuente: Los Autores

3.1.2.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

3.1.2.1.1. ANEMÓMETRO

El anemómetro es un dispositivo meteorológico muy usado para medir la velocidad del viento, con el objetivo de predecir el clima. Como función principal es medir los cambios repentinos de la velocidad del aire, primordialmente en zonas turbulentas, para esta técnica se acude al anemómetro de filamento caliente, que tiene un hilo de platino o níquel calentado eléctricamente, el efecto del viento es enfriarlo haciendo variar su resistencia, por ende, la corriente que viaja por el hilo es proporcional a la velocidad del viento. El anemómetro utilizado para dichas mediciones es de la marca KANOMAX SYSTEM 6244 (MODEL 1470) este equipo es diseñado para medir el flujo de aire simultáneamente en 4 puntos distintos. El equipo puede mostrar un canal en su pantalla, pero con el software para PC incluido, monitorea los 4 canales en tiempo real.



Figura 3.13: Anemómetro de Hilo Caliente

Fuente: Los Autores

3.1.2.1.2. MEDIDOR DE FLUJO DE AIRE

El Airflow Meter es un instrumento de mano que mide presión diferencial, calcula la velocidad de flujo del aire. El tubo Pitot es usado para medir la velocidad presión dentro de un conducto. La presión de velocidad es la presión resultante de mover aire dentro del conducto. Como la velocidad de aire aumenta, la presión de velocidad también aumenta.

El INAMHI cuenta con un equipo para la medición de la velocidad de flujo en conductos, marca Fluke modelo 922, las características se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.14: Medidor de Flujo de Aire
Fuente: Los Autores

Parameter	Range	Accuracy	Resolution	Units Displayed
Air Pressure	± 4000 Pascal	±1% + 1 Pascal	1 Pascal	Pa
	± 16 in H ₂ O	±1% + 0.01 in H ₂ O	0.001 in H ₂ O	in H ₂ O
	± 400 mm H ₂ O	±1% + 0.1 mm H ₂ O	0.1 mm H ₂ O	mm H ₂ O
	± 40 mbar	±1% + 0.01 mbar	0.01 mbar	mb
	± 0.6 PSI	±1% + 0.0001 PSI	0.0001 PSI	PSI
Air Velocity	250-16,000 fpm	±2.5% of reading at 2000 fpm (10.00 m/s)	1 fpm	fpm
	1-80 m/s		0.001 m/s	m/s
Air Flow (Volume)	0-99,999 cfm	accuracy is function of velocity and duct size	1 cfm	cfm
	0-99,999 m ³ /hr		1 m ³ /hr	m ³ /hr
	0-99,999 l/s		1 l/s	l/s
Temperature	0 to 50 °C	±1 % + 2 °C	0.1 °C	°C
	32 to 122 °F	±1 % + 4 °F	0.1 °F	°F

Use of Zero function is required to achieve these specifications.

Figura 3.15: Especificaciones del Fluke 922
Fuente: INAMHI

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población y la muestra de la investigación son un conjunto de objetos que comparten ciertas características que facilitan delimitar la investigación.

3.2.1. POBLACIÓN

La población objetivo del estudio está constituida por los modelos de autobuses interprovinciales homologados en el Ecuador. La tabla 3.1 muestra un listado de los modelos autorizados por la Agencia Nacional de Tránsito. Con el certificado de homologación vigente a la fecha 14 de febrero de 2018.

En la columna a y c, se observa las empresas carroceras encargadas de la fabricación de autobuses, y en la columna b y d, el número de unidades homologadas. La población universo tiene un total de 149 unidades, pero en la investigación no es factible realizar el estudio con todos los modelos. Por lo tanto el estudio tomará dos modelos de los existentes en el mercado nacional.

Tabla 3.1: Listado de fabricantes de unidades homologadas en el servicio de transporte interprovincial (14-02-2018).

a	b	c	d
FABRICANTES	UNIDADES HOMOLOGADAS	FABRICANTES	BUSES HOMOLOGADOS
YAULEMA	3	PEREZ	3
ALME	2	RODRIGUEZ	1
ALTAMIRANO	2	SANTA CRUZ	2
AUSTRAL	2	SOLIS	3
COPSA	2	CEPEDA CIA. LTDA.	9
CMA- CENTAURO	1	YAULEMA JR	2
DARWIN CEPEDA	1	CORPMEGABUSS	8
CADELVA	1	MARIELBUS	4
FIALLOS	1	ECUACAR	3
IMCE	6	EUROCARROCERIAS	2
IMPEDSA	1	IBIMCO	2
MANBUSS	2	ICEDCA	3
LOS ANDES	1	IMBABUS	1
MONCAYO	4	SANABRIA	2
MAYORGA	2	METALICAS PILLAPA	3
SANTA GEMA	2	MIRAL	9
MODELO	3	PATRICIO CEPEDA	10
OLIMPICA CIA LTDA	11	PICOSA	7
METALBUSS	1	IMESCO	1
ALVARADO	2	VARMA	4
GUZMAN	19	ZAMORA	1
TOTAL			149







Fuente: [10]

3.2.2. MUESTRA

La muestra para el estudio, está basada en dos geometrías idealizadas a una carrocería de autobús. Como pasos iniciales para analizar el comportamiento aerodinámico en los autobuses. Además los modelos de autobuses comerciales en la Provincia de Tungurahua, denominados como: modelo 1 y modelo 2.

La tabla 3.2, muestra en la columna 1 los modelos de autobuses a analizar, añadiendo 2 modelos idealizados a una carrocería y los dos modelos de autobuses sin y considerando las llantas que son objeto de estudio. En la columna 2 está la descripción de cada uno de los modelos, y en la columna 3, los perfiles realizados en el software CAD.

Tabla 3.2: Geometrías de modelos de análisis.

1	2	3
Modelos	Descripción	Geometrías
Rectángulo sin redondeos	Se la considera como una forma primitiva de la carrocería de un autobús.	<p data-bbox="986 465 1155 479">Perfil rectángulo sin redondeos</p> 
Rectángulo con redondeos	Es una forma primitiva con redondeados en sus vértices similares a la carrocería de un autobús.	<p data-bbox="986 696 1155 710">Perfil rectángulo con redondeos</p> 
Modelo 1	Perfil de autobús en 2D para modelos de carrocerías sin llantas más comerciales.	<p data-bbox="1034 936 1107 949">Perfil autobus</p> 
Modelo 2	Perfil de autobús en 2D para modelos de carrocerías sin llantas más comerciales.	<p data-bbox="1034 1162 1107 1176">Perfil autobus</p> 
Modelo 1	Perfil de autobús en 2D para modelos de carrocerías con llantas más comerciales.	<p data-bbox="1023 1388 1166 1402">Perfil autobus con llantas</p> 
Modelo 2	Perfil de autobús en 2D para modelos de carrocerías con llantas más comerciales.	<p data-bbox="1018 1619 1171 1632">Perfil de autobus con llantas</p> 

Fuente: Los Autores

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Es una metodología para poder descomponer deductivamente las variables que rigen a la investigación, es decir a la variable dependiente e independiente.

3.3.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Resistencia aerodinámica de autobuses.

Tabla 3.3: Operacionalización de Variable Independiente.

Conceptualización	Categoría	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
La resistencia aerodinámica que pueden tener los autobuses en carreteras a distintas velocidades.	Análisis CFD	Condiciones iniciales y de frontera. Geometría del autobús. Dimensionamiento de la grilla del volumen de control. Tipos de resolvers. Frecuencia de desprendimiento de vórtices.	¿Cuál es el modelo geométrico que tiene menor resistencia aerodinámico? ¿Cuál es el modelo geométrico que presenta mayor estabilidad.?	Simulación Solver CFD ANSYS FLUENT VisIt GNUplot Túnel de viento

Fuente: Los Autores

3.3.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Las alternativas de las geometrías de los buses.

Tabla 3.4: Operacionalización de Variable Dependiente.

Conceptualización	Categoría	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
Comparación de resultados entre los modelos geométricos para comparar con estudios de referencia.	Comparación entre los modelos geométricos de autobuses.	Dimensiones de los modelos geométricos. Velocidad de avance del autobús. Modelos a escala de los modelos geométricos.	¿Cuál es la diferencia entre un modelo CFD y experimento en túnel de viento? ¿Qué similitud existen en resultados entre los modelos geométricos.?	Software de dibujo 2D y 3D. Técnicas de impresión en 3D.

Fuente: Los Autores

3.4. PLAN DE RECOLECCIÓN DE DATOS

En la presente sección se especifican los modelos que están sujetos al estudio, la configuración de las condiciones iniciales y de borde del problema de Reimann. Los modelos de referencia para calibrar el esquema numérico con el cilindro de Von Karman, y los modelos de carrocerías de autobuses seleccionados dentro de un dominio computacional.

3.4.1. CALIBRACIÓN DE RESULTADOS

3.4.1.1. MODELOS DE REFERENCIA

Para calibrar los resultados que proporcionan el software ANSYS Fluent, se realiza un ejemplo clásico de la mecánica de fluidos como la calle de vórtices de Von Karman y sus efectos de vorticidad al paso del flujo (ver <https://confluence.cornell.edu>), para una solución de flujo inestable (transitorio) y el fenómeno de la frecuencia de desprendimiento.

Para los modelos de calibración 1 y 2, los datos usado son similares a las condiciones iniciales del modelo referencia, variando el método de interpolación de primer y segundo orden respectivamente.

Para los modelos de calibración 3 y 4 se utilizaron los datos recopilados de NPARC, modificando la grilla de la geometría, con el fin de disminuir el consumo computacional.

En la tabla 3.5, se configura las condiciones iniciales y de borde para la simulación numérica del cilindro de Von Karman, definiendo de derecha a izquierda: el diámetro del cilindro (D), densidad del fluido (ρ), viscosidad del fluido (μ), velocidad del fluido (v), el número de Reynolds (Re), el tiempo de paso por cada iteración y el método de interpolación utilizado para resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos.

Tabla 3.5: Condiciones de frontera

Modelos	Parámetros Iniciales						
	Diámetro de cilindro	Densidad del fluido	Viscosidad del fluido	Velocidad del fluido	Número de Reynolds	Time step	Método de interpolación
Unidades	D [m]	ρ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	μ $\left[\frac{\text{kg}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right]$	v $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	Re[adimen.]	[s]	-
Referencia	2,00	75,00	1,00	1,00	150,00	0,40	1 ^{er} Orden
Calibración 1	2,00	75,00	1,00	1,00	150,00	0,40	1 ^{er} Orden
Calibración 2	2,00	75,00	1,00	1,00	150,00	0,40	2 ^{do} Orden
Calibración 3	2,00	1,271	1,131	66,755	150,00	0,0065	1 ^{er} Orden
Calibración 4	2,00	1,271	1,131	66,755	150,00	0,0065	2 ^{do} Orden

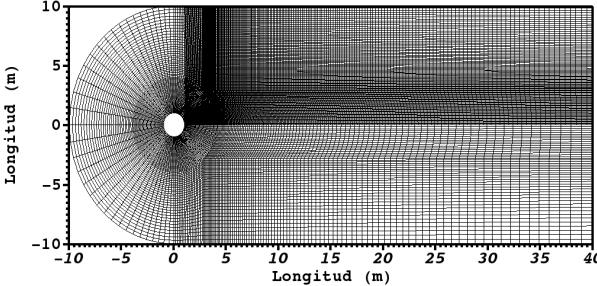
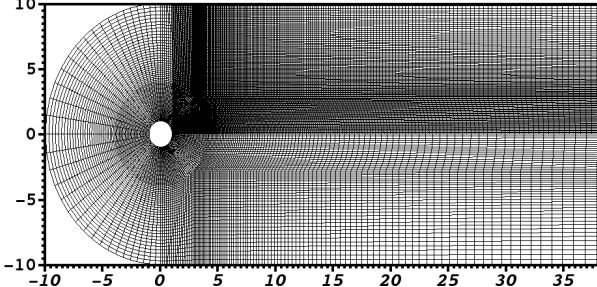
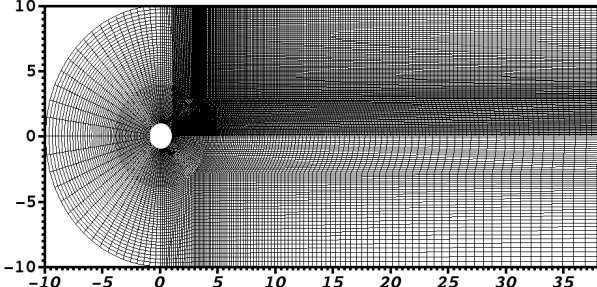
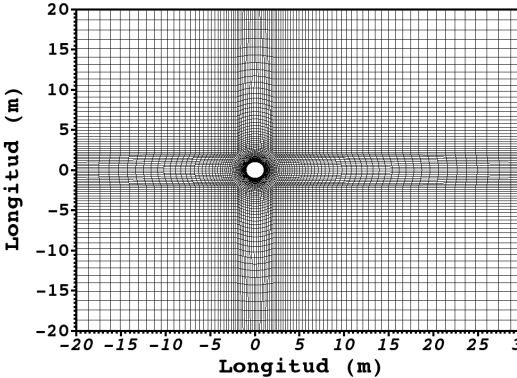
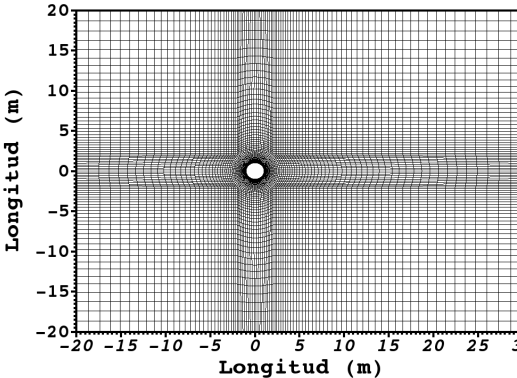
Fuente: Los Autores

Para el cálculo del paso de tiempo para todos modelos de calibración, se usó el procedimiento siguiente:

- El número de Reynolds se estableció para flujo laminar de $Re = 150$.
- Con la ecuación 2.13 se determinó el número de Strouhal dando $Sr = 0,1854$.
- Con la ecuación 2.12 se calcula la frecuencia de desprendimiento dando $f = 0,0927$ [Hz].
- Se sabe que $f = \frac{1}{T}$ donde T : Período y se lo calcula dando $T = 10,7875$ [s].
- Para el paso de tiempo se aplica $\Delta t = \frac{T}{(20 - 25)}$. Para este caso se aplicó $\frac{T}{25}$ dando resultados como un paso de tiempo = $0,4315$ [s] $\approx 0,40$ [s].

El mismo procedimiento se realizó para los modelos de calibración 3 y 4, dando un paso de tiempo = $0,006465$ [s] $\approx 0,0065$ [s]. A continuación, en la tabla 3.6 se presenta la configuración de la grilla del modelo de calibración. En la columna 1 se muestran el nombre del modelo de referencia y calibración, mientras en la columna 2, muestra la grilla de los modelos con dimensiones del dominio computacional de control.

Tabla 3.6: Geometrías de referencia y calibración.

Modelos	Geometrías
Referencia	
Calibración 1	
Calibración 2	
Calidación 3	
Calibración 4	

Fuente: Los Autores

La tabla 3.6 muestra la estructura de la grilla de los modelos de calibración 3 y 4.

Para acceder a los archivos de la estructura de la grilla de los modelos de referencia, calibración 1 y 2, y los modelos de calibración 3 y 4.

▪ **Descripción del tamaño y mallado de los modelos para calibración.**

Para el tamaño geométrico de modelos de referencia, calibración 1 y 2 se usó las siguientes dimensiones.

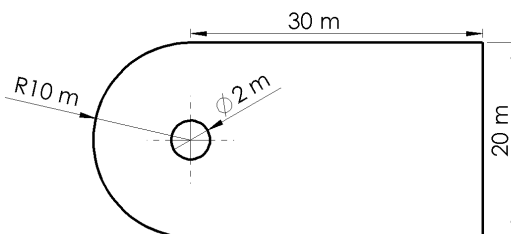


Figura 3.16: Dimensiones de la geometría

Fuente: Autores

Para los modelos de referencia, calibración 1 y 2 se utilizó el siguiente geometría y mallado.

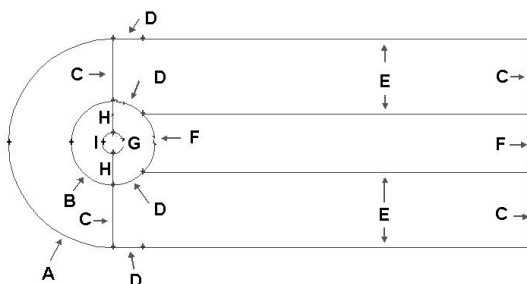


Figura 3.17: Número de divisiones en la geometría

Fuente: Autores

A continuación, se detalla cómo fue realizado la división de las aristas de la geometría.

Tabla 3.7: Propiedades del mallado

Arista	Propiedad del mallado en aristas
A	Dividir en 36 partes, con una longitud de 0,50
B	Dividir en 36 partes, con una longitud de 0,20
C	Dividir en 30 partes, con una longitud de 0,10
D	Dividir en 18 partes
E	Dividir en 90 partes, con una longitud de 0,10
F	Dividir en 36 partes
G	Dividir en 72 partes
H	Dividir en 30 partes
I	Dividir en 36 partes, con una longitud de 0,05

Fuente: Los Autores

Para las condiciones iniciales se configuró de la siguiente manera.

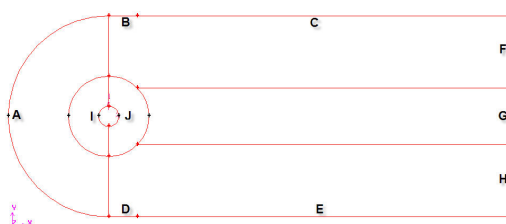


Figura 3.18: Condiciones iniciales de la geometría

Fuente: Autores

Las condiciones de frontera iniciales se configuraron de la siguiente forma.

Tabla 3.8: Condiciones de Frontera

Arista	Condición inicial
A	Inlet o entrada de flujo
B,C	Wall o pared rígida
D,E	Wall o pared rígida
F,G,H	Outlet o salida de flujo
I,J	Cylinder o cilindro

Fuente: Los Autores

■ **Condiciones de Borde.**

Los problemas de CFD se definen en términos de condiciones de borde o frontera. En problemas transitorios, los datos iniciales de todas las variables de flujo se especifican en todos los puntos de solución en el dominio del flujo. Las condiciones de frontera más comunes en las ecuaciones discretizadas del método de volúmenes finitos tenemos: inlet, outlet, wall, y symmetry.

Antes de proceder con los cálculos numéricos, es necesario una descripción de las condiciones de frontera, que se añaden al problema numérico. En la entrada del dominio, se proporciona un perfil de velocidad constante y en la salida una condición de gradiente de flujo de velocidad cero. (ver ecuaciones 3.1 y 3.2)

Asumiendo q como una cantidad escalar y n es la dirección de coordenadas ortogonal al plano límite, la secuencia es la siguiente:

Las condiciones (inlet/outlet), establecen el gradiente con el valor de cero en dicha condición.

$$\frac{\partial q}{\partial \bar{n}} = 0, \quad \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \bar{n}} = 0 \tag{3.1}$$

Condiciones de paredes rígidas (wall). Las variables son simétricas y los componentes en los campos vectoriales son de igual magnitud pero de sentido contrario.

$$q \rightarrow q; \quad v_n \rightarrow -v_n; \quad v_t \rightarrow v_t \tag{3.2}$$

donde n (t) es normal (tangencial) a la interfaz

3.4.1.2. MODELOS DE ANÁLISIS SIN MODELOS DE TURBULENCIA

El análisis numérico inicia con modelos idealizados de las carrocerías, luego el estudio se enfoca en los modelos geométricos de los autobuses (ver tabla 3.2).

Los modelos establecidos para el análisis son de diferentes carrocerías, definidos como: Modelo 1 (M1) y Modelo 2 (M2).

Las dimensiones principales de los modelos geométricos de autobuses son: la longitud, el ancho, y la altura general. A continuación, en la tabla 3.9 están detallados sus valores:

Tabla 3.9: Dimensiones generales de carrocerías

Modelos	Dimensiones principales		
	Longitud	Altura	Ancho
	L [m]	H [m]	e [m]
Modelo 1	12,10	3,60	2,58
Modelo 2	13,10	3,80	2,60

Fuente: Los Autores

A continuación, se detallan las condiciones iniciales para el análisis numérico (ver tabla 3.10). Para efectos de estudio el diámetro que se presentó en la tabla 3.5, es sustituida por la longitud característica (L) de las carrocerías, y dos modelos idealizados a las carrocerías, siendo un rectángulo sin redondeos (RSR) y un rectángulo con redondeos (RCR).

El cálculo de los valores para el paso de tiempo se realizaron como se detalló en la sección 3.4.1.1. En la tabla 3.10, están detallados parámetros para el análisis numérico de los modelos geométricos como: la temperatura ambiente (15°C), la densidad del aire, la viscosidad del aire, y con ello calcular el número de Reynolds (ver anexo 7.2).

Además, la velocidad permitida para autobuses en carreteras, según los límites de velocidad en el artículo 191 del Reglamento de la ley del transporte terrestre, tránsito y seguridad vial, el límite de velocidad para vehículos de transporte público es de 90 kmh^{-1} y un rango moderado de 90 a 115 kmh^{-1} para vías rectas, para este análisis la velocidad escogida es 90 kmh^{-1} (25 ms^{-1}), 100 kmh^{-1} ($27,778\text{ ms}^{-1}$) y 120 kmh^{-1} ($33,33\text{ ms}^{-1}$) [1].

Tabla 3.10: Condiciones de iniciales a 90 kmh^{-1}

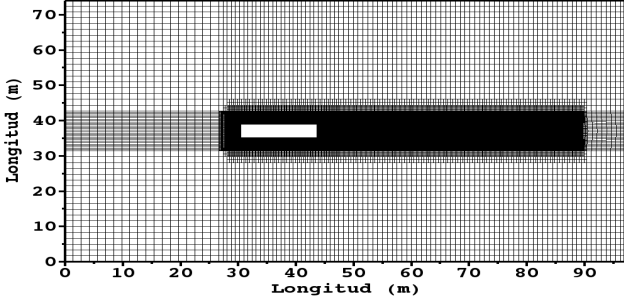
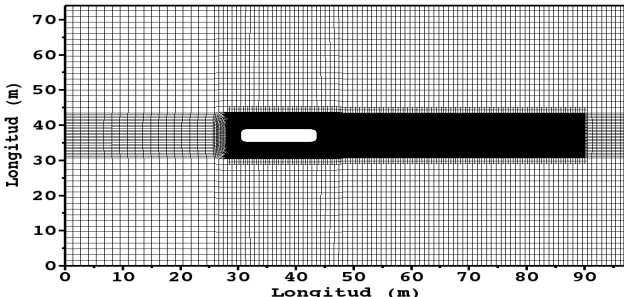
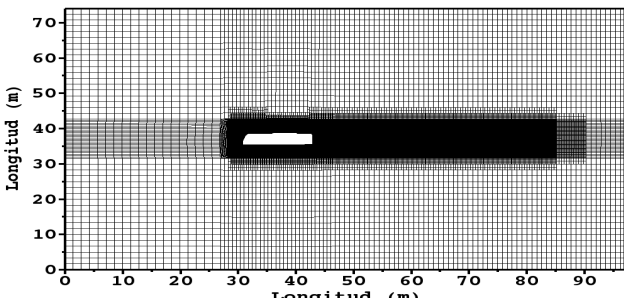
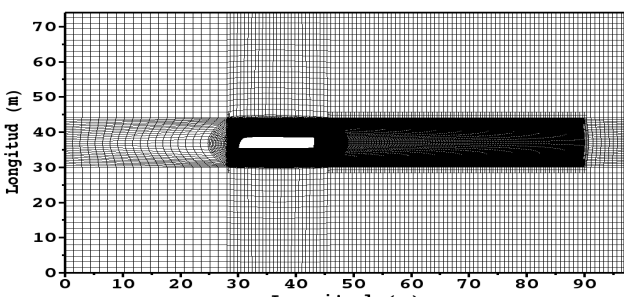
Modelos	Parámetros Iniciales						
	Longitud característica	Densidad del fluido	Viscosidad del fluido	Velocidad del fluido	Número de Reynolds	Time step	Método de interpolación
	L [m]	ρ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	μ [$\frac{\text{kg}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$]	v [$\frac{\text{m}}{\text{s}}$]	Re [Adimensional]	[s]	-
RSR	13,10	1,225	$1,79\text{e}^{-5}$	25,00	$22,43\text{e}^6$	0,05	2^{er} Orden
RCR	13,10	1,225	$1,79\text{e}^{-5}$	25,00	$22,43\text{e}^6$	0,05	2^{er} Orden
M1	12,10	1,225	$1,79\text{e}^{-5}$	25,00	$20,73\text{e}^6$	0,05	2^{do} Orden
M2	13,10	1,225	$1,79\text{e}^{-5}$	25,00	$22,43\text{e}^6$	0,05	2^{er} Orden

Fuente: Los Autores

Para efecto del estudio las condiciones iniciales en los modelos M1 y M2, son duplicados, variando la velocidad del fluido a 90 kmh^{-1} , 100 kmh^{-1} y 120 kmh^{-1} ; sin embargo, los modelos RSR, RCR, M1 y M2 fueron analizados a velocidad de 90 kmh^{-1} , para contrastar los resultados del comportamiento aerodinámico.

Para un análisis numérico es necesario realizar un mallado de volumen de control. A continuación, se presenta el detalle de grilla. En la tabla 3.11, la grilla fue refinada alrededor de la geometría a analizar, las medidas tomadas de referencia para el refinamiento fueron a partir de la posición (0,0), el intervalo usado fue el punto inferior (28,30) hasta (90,44) todos los puntos están en metros. Para visualizar la malla ingrese al Link: RSR, RCR, M1, M2.

Tabla 3.11: Mallado de geometrías para modelos de análisis

MODELOS	GRILLA DE GEOMETRÍAS
RSR	 <p>The RSR grid shows a rectangular domain with a central horizontal slot. The x-axis (Longitud) ranges from 0 to 90, and the y-axis (Longitud) ranges from 0 to 70. The grid is uniform, with a slight refinement around the central slot.</p>
RCR	 <p>The RCR grid is similar to RSR but features a more pronounced refinement of the grid lines around the central slot, indicating a higher resolution in that region.</p>
M1	 <p>The M1 grid shows a further refinement of the grid lines around the central slot, with the grid becoming significantly denser in the immediate vicinity of the slot's edges.</p>
M2	 <p>The M2 grid exhibits the highest level of refinement, with the grid lines around the central slot being extremely dense and curved, following the geometry of the slot's edges.</p>

Fuente: Los Autores

3.4.1.3. MODELOS DE ANÁLISIS CON MODELOS DE TURBULENCIA

Para el análisis numérico existen esquemas que permiten predecir el comportamiento del flujo en escalas menores, denominados modelos de turbulencia.

Los esquemas de turbulencia fueron considerados dentro de análisis numérico de los modelos de autobuses originales con y sin modificaciones, y los modelos de autobuses con y sin llantas, para evaluar los resultados obtenidos. El modelo de turbulencia usado es: $\kappa - \epsilon$ que engloba el concepto de la viscosidad remolino y enlaza a la energía cinética turbulenta y disipación.

3.5. PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

Para el procesamiento de los resultados obtenidos en los modelos geométricos reportados en este trabajo de investigación, se realizó el proceso siguiente:

- Generación de modelos geométricos para las carrocerías de los autobuses conjuntamente con los modelos ideales de referencia.
- Definición de las condiciones iniciales y de frontera para cada uno de los casos a analizar.
- Simulación de los modelos ideales de referencia para calibración de resultados y de los modelos a analizar con las condiciones respectivas.
- Interpretación y análisis de los resultados obtenidos en el análisis numérico con la ayuda de visualizadores de resultados como VisIt, GNUplot.
- Planteamiento de alternativas geométricas a las carrocerías de autobuses que permitan mejorar su aerodinámica y estabilidad.

CAPÍTULO IV

El estudio del comportamiento aerodinámico que trata este capítulo se ha dividido en tres etapas:

- PARTE I: Estudio aerodinámico de carrocerías de autobuses
- PARTE II: Planteamiento de alternativas para mejorar la aerodinámica de carrocerías de autobuses
- PARTE III: Contraste del estudio numérico - experimental de las carrocerías de autobuses

PARTE I: ESTUDIO AERODINÁMICO DE CARROCEÍAS DE AUTOBUSES

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se simuló, analizó e interpretó los datos obtenidos de las simulaciones de los diferentes casos propuestos. Para la recolección de datos se utilizó el software de cálculo fluidodinámico Fluent con el cual se procedió al análisis de las distintas geometrías propuestas en la presente tesis experimental. Los datos de referencia se tomaron de la página NPARC para la simulación de los casos presentados en la sección 3.4.1.1 tanto de los modelos de referencia para la calibración de resultados como de los modelos geométricos de los autobuses.

El módulo de Fluent se usó para la configuración de las condiciones iniciales y de borde. Este software nos permite exportar los resultados en formatos .cgns que nos proporciona las variables como presión, densidad, vorticidad, velocidad del fluido y que puedan leerse en VisIt.

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MODELOS DE REFERENCIA PARA CALIBRACIÓN

Al simular los modelos de referencia para calibración de resultados obtenidos con ANSYS Fluent, utilizando las ecuaciones de período y de frecuencia como las que se mencionaron en el capítulo 2, se realizaron cálculos del periodo (T), la frecuencia de desprendimiento (f) y el número de Strouhal calculado (Sr_c) usando la ecuación 2.13, adicionalmente se calculó un error relativo entre el Sr_t teórico y el Sr_c calculado como se detallará más adelante.

En la tabla 4.12, se presentan los resultados obtenidos luego de realizar las simulaciones en Ansys Fluent, en la primera fila de izquierda a derecha, se pueden observar todos los parámetros considerados para calcular como el número de Strouhal teórico, el período, la frecuencia de desprendimiento, el número de Strouhal calculado, el error relativo y el método de interpolación. En el mismo orden, en la segunda fila, están las unidades de medida para cada parámetro.

A partir de la fila 3 hasta la fila 7, se encuentran los valores obtenidos con los resultados de cada uno de los parámetros mencionados. Para el cálculo del error relativo se utilizó $\varepsilon = \left| \frac{Sr_t - Sr_c}{Sr_t} \right| \times 100$ donde ε es el error relativo porcentual

Tabla 4.12: Resultados de modelos de referencia

Modelos	Parámetros calculados					
	Número de Strouhal teórico	Período	Frecuencia de desprendimiento	Número de Strouhal calculado	Error relativo	Método de interpolación.
Unidades	Str_t	$T [s]$	$f [Hz]$	Str_c	$\varepsilon [\%]$	-
Referencia	0,1854	11,641	0,0859	0,1718	7,30	1 ^{er} Orden
Calibración 1	0,1854	11,575	0,0864	0,1728	6,80	1 ^{er} Orden
Calibración 2	0,1854	10,400	0,0961	0,1922	3,67	2 ^{do} Orden
Calibración 3	0,1854	0,1710	5,8480	0,1752	5,50	1 ^{er} Orden
Calibración 4	0,1854	0,1645	6,0790	0,1821	1,78	2 ^{do} Orden

Fuente: Los Autores

4.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE MODELOS DE REFERENCIA

De los resultados presentados en la tabla 4.12, se puede concluir lo siguiente:

- Los resultados obtenidos en la calibración 1 con un método de interpolación de primer orden para las ecuaciones de Naviers-Stokes que resuelve Fluent, se obtuvo un error relativo de 6,80 % inferior al que se encontró en la web como referencia.
- Para la calibración 2 con un método de interpolación de segundo orden y bajo las condiciones de frontera establecidas antes, se obtuvo un error relativo más pequeño que la calibración 1 el valor es 3,67 % en comparación con el número de Strouhal teórico obtenido con la ecuación 2.13.
- Para el caso de calibración 3 donde se cambió varios parámetros como: densidad, viscosidad, velocidad del fluido mencionados en la sección 3.4.1, además se utilizó un método de interpolación de primer orden se obtuvo un error relativo de 5,50 %, este valor también fue comparado con el número de Strouhal teórico.
- El caso de calibración 4 con las mismas condiciones de frontera del caso de calibración 3 con el único cambio del método de interpolación de segundo orden, al final se obtuvo un error relativo de 1,78 % en comparación al número de Strouhal teórico.

A continuación, se presentan las variables de presión y vorticidad con los gráficos de las simulaciones realizadas a los tiempos de 2, 4, 8, 12, 16, 20, 32 segundos. La variable de densidad no se la consideró puesto que en los modelos de calibración el fluido es considerado como incomprensible y por ende la densidad es constante en el tiempo. Para visualizar de mejor manera los resultados se realizó un corte al mallado presentado antes. Además, no se tomó en cuenta el $t = 0$ s pues en la sección 3.4.1.1, se presentaron las condiciones iniciales para la simulación de cada uno de los modelos de calibración.

En la tabla 4.13, se puede observar en la primera fila el tiempo y los modelos de calibración 1 y 2.

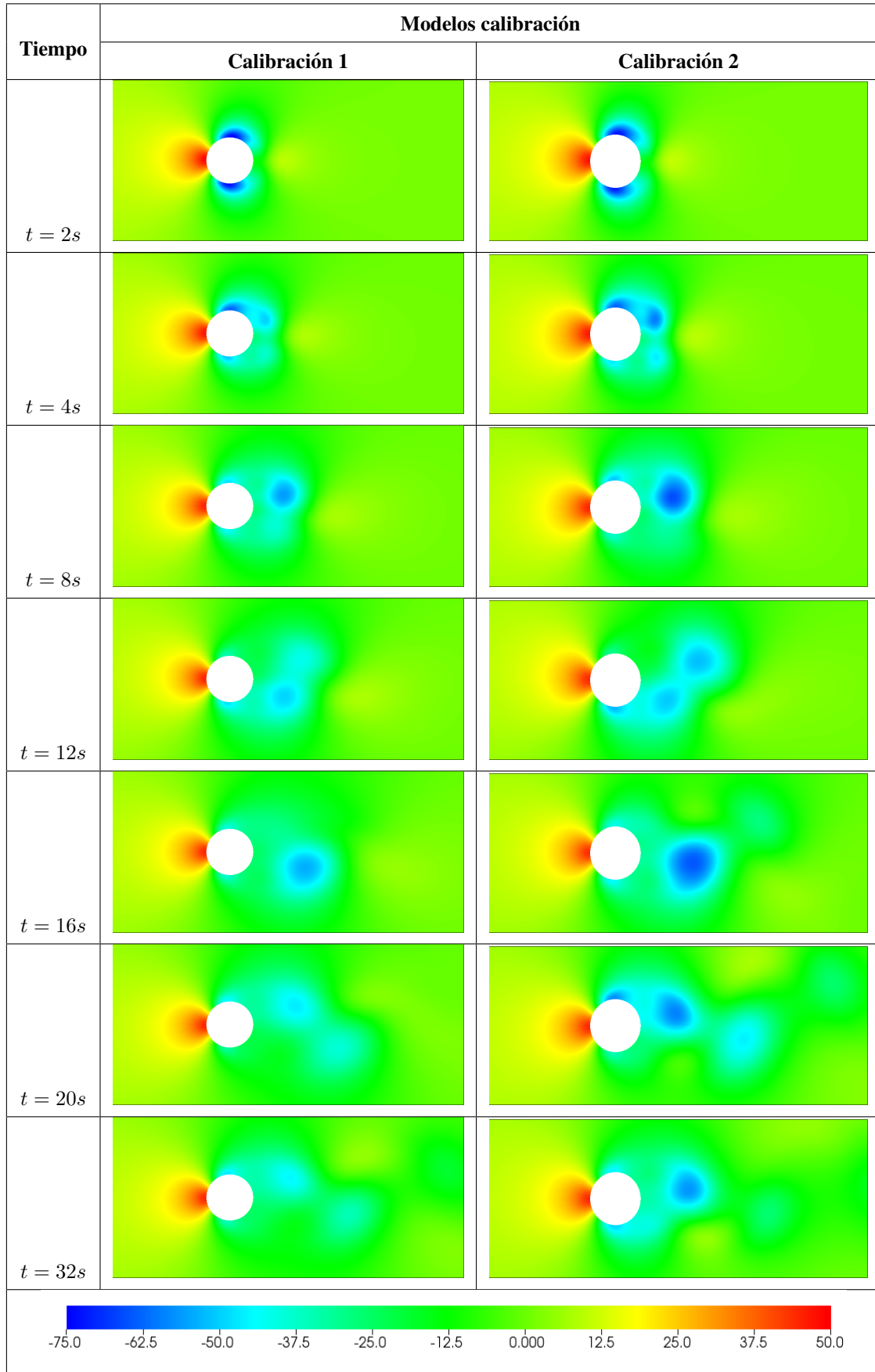
En el panel de tiempo, éste va cambiando desde los 2 segundos hasta los 32 segundos de simulación. La escala de colores usados para estos modelos varía entre -75 Pa hasta 50 Pa. En la columna de calibración 1 con un método de interpolación de primer orden se puede observar como varía la presión a lo largo del tiempo y como hay lugares de alta y baja presión de acuerdo a la escala de colores presentada al final de la tabla. En la columna de calibración

2 usando el método de interpolación de segundo orden se observan variaciones más pronunciadas en las zonas de altas y bajas presiones, así mismo, el desprendimiento del fluido se hace más notorio con respecto al tiempo.

En la tabla 4.14, se puede observar en la primera fila el tiempo y los modelos de calibración 3 y 4.

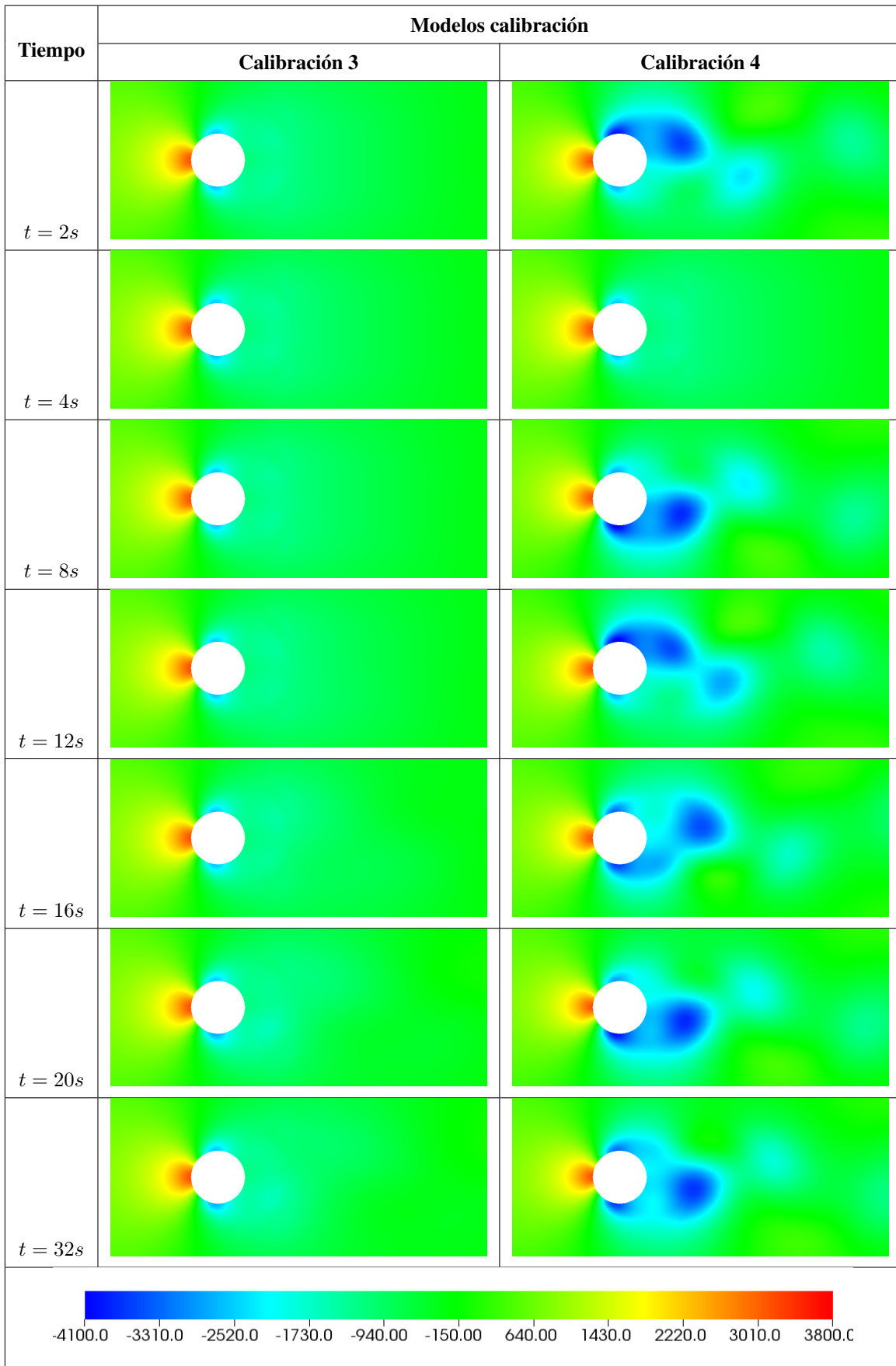
En el panel de tiempo, éste va cambiando desde los 2 segundos hasta los 32 [s] de simulación de similar manera a la tabla anterior. La escala de colores usados para estos modelos varía entre -4100 Pa hasta 3800 Pa, el cambio de la escala para estos modelos se debe a los parámetros iniciales establecidos. En la columna de calibración 3 con un método de interpolación de primer orden se puede observar las zonas de baja presión no se notan de mejor manera y se puede ver que a partir del tiempo 20 [s] hay un ligero cambio en estas zonas. En la columna de calibración 4 usando el método de interpolación de segundo orden se observan variaciones más pronunciadas en las zonas de alta y baja presión, en comparación con la calibración 3 el fluido se desprende más rápido con el tiempo.

Tabla 4.13: Presión a diferentes tiempos de las simulaciones



Fuente: Los Autores

Tabla 4.14: Presión a diferentes tiempos de las simulaciones



Fuente: Los Autores

A continuación, se presentan gráficos de la vorticidad para los modelos de calibración a diferentes tiempos de la simulación. Para visualizar de mejor manera los resultados se realizó un corte al mallado presentado antes.

De la misma manera en los modelos de calibración 1, 2, 3 y 4 tampoco se tomaron en cuenta los gráficos a $t = 0$ s.

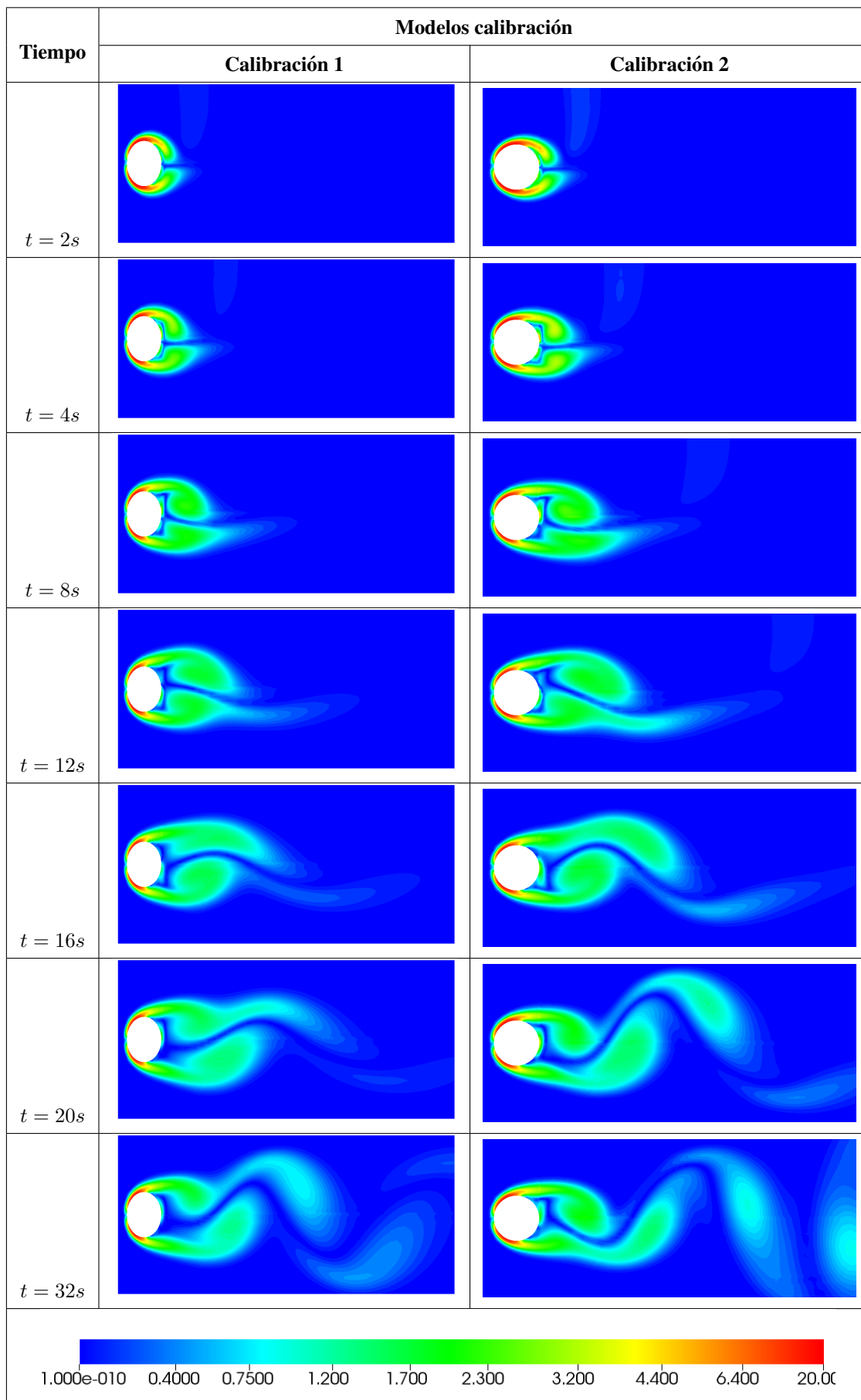
En la tabla 4.15, se muestran en la fila 1, el tiempo de simulación y el tiempo a los cuales fueron tomados los gráficos. La escala usada para los modelos de calibración 1 y 2 tuvo un rango desde $1e^{-10}$ a $20 s^{-1}$

El panel del tiempo de simulación, éste varía entre los 2 [s] hasta los 32 [s]. En la columna de calibración 1 con el método de interpolación de primer orden se presentan varios gráficos, ahí se puede evidenciar que los vórtices de desprendimientos se forman a partir del tiempo 8 [s] y a los 20 [s] ya hay presencia desprendimientos del fluido. En la columna de calibración 2 con el método de interpolación de segundo orden la formación de vórtices es más notorio a los 8 [s] en comparación de modelo de calibración 1, y a partir de los 12 [s] los vórtices empiezan a desprenderse con el paso del tiempo.

En la tabla 4.16, se muestran en la fila 1, el tiempo de simulación y el tiempo a los cuales fueron tomados los gráficos. La escala usada para los modelos de calibración 3 y 4 tuvo un rango desde $1e^{-10}$ s a $1000 s^{-1}$, para ambos modelos.

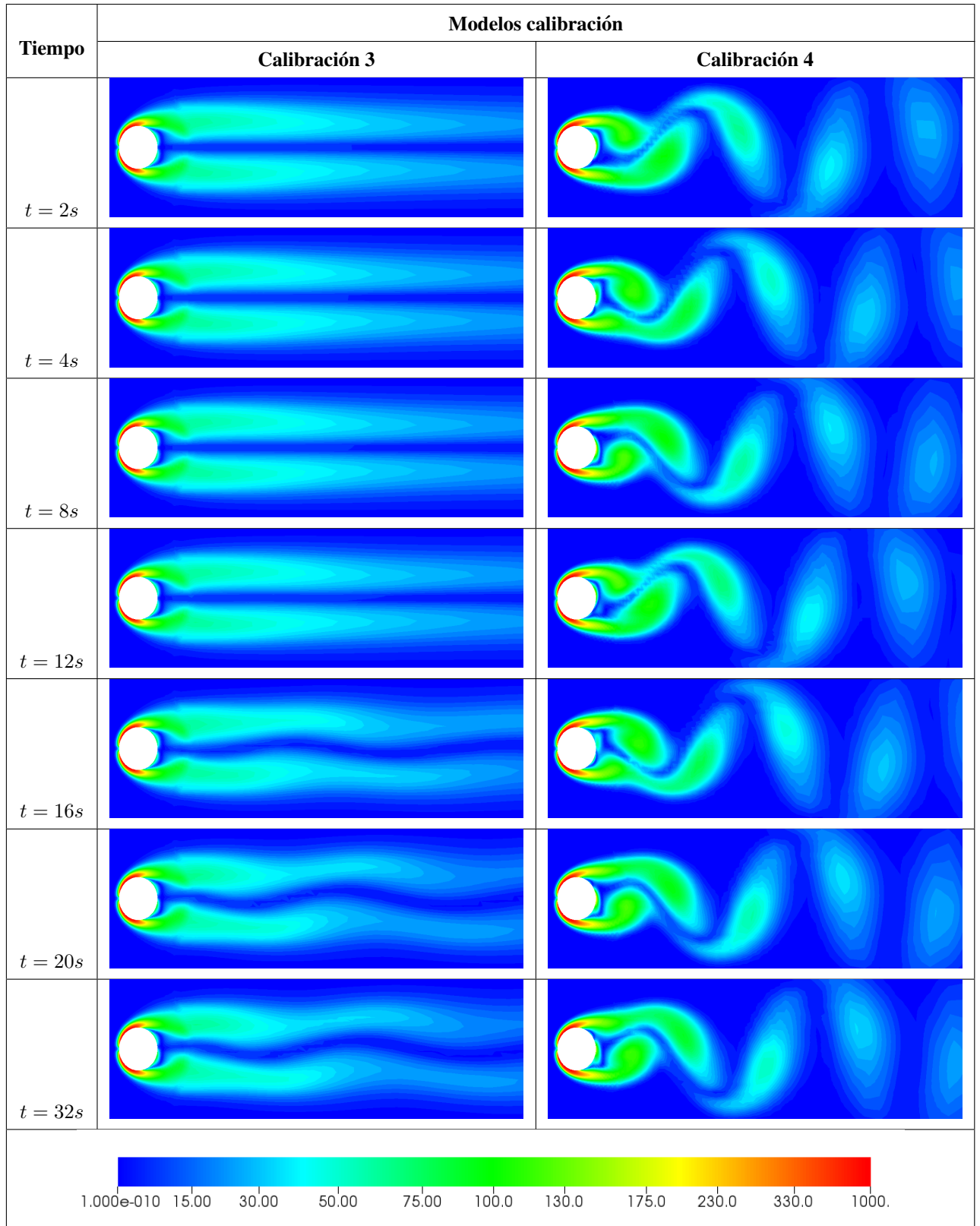
En panel del tiempo de simulación, éste varía entre los 2 [s] hasta los 32 [s]. En la columna de calibración 3 con el método de interpolación de primer orden se presentan varios gráficos. Estos muestran un comportamiento del fluido de manera laminar puesto que el fluido no realiza desprendimientos de los vórtices, sin embargo, a partir del tiempo 32 [s] empieza a formar pequeñas oscilaciones del fluido. En la columna de calibración 2 con el método de interpolación de segundo orden la formación de vórtices es más notorio a partir de los 2 segundos en comparación con el modelo de calibración 1, las oscilaciones que presenta el fluido es amplio por lo que en la mayor parte de los gráficos los desprendimientos de los vórtices se pueden observar de mejor manera.

Tabla 4.15: Vorticidad a diferentes tiempos de las simulaciones



Fuente: Los Autores

Tabla 4.16: Vorticidad a diferentes tiempos de las simulaciones



Fuente: Los Autores

Para poder interpretar los resultados de la vorticidad presentada en las tablas 4.15, el coeficiente de sustentación (C_l) mismo se presenta en la figura 4.19 donde se compara los modelos de calibración 1 y 2, donde la línea de color azul corresponde al modelo de calibración 1 con un método de interpolación de primer orden donde el (C_l) para este caso tiene un valor máximo de 0,60 donde la frecuencia se estabiliza, mientras que la línea de color rojo para la calibración 2 con el método de interpolación de segundo orden, el (C_l) toma un valor máximo 0,62 cuando la frecuencia de este parámetro se estabiliza. La diferencia más notoria se hace porque el método interpolación de segundo orden capta menor error entre las iteraciones realizadas por Fluent (ver figura 4.19) gráfico de color rojo.

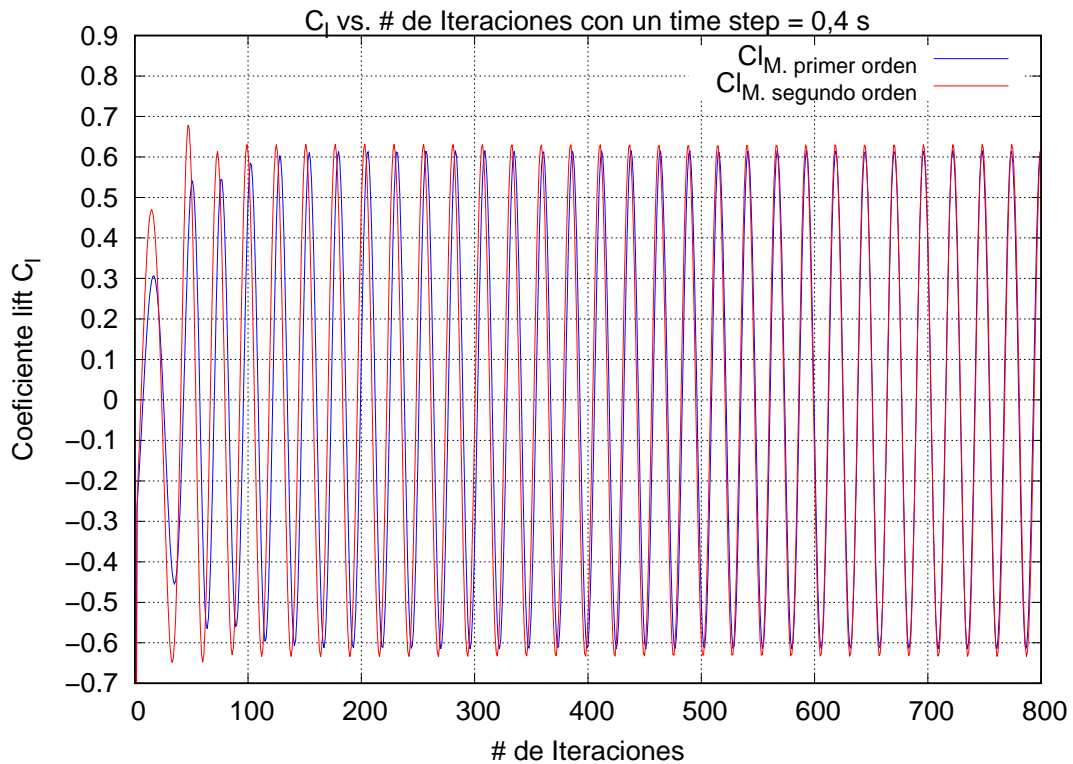


Figura 4.19: El coeficiente de sustentación para la validación 1 (azul) y 2 (rojo) tienen similitud entre las curvas generadas, permitiendo notar que la diferencia entre los métodos de interpolación usados no es significativa.

Fuente: Los Autores

Para poder interpretar de mejor manera los resultados de la vorticidad presentada en la tabla 4.16, el coeficiente de sustentación (C_l) mismo que se presenta la figura 4.20 donde compara el modelo de calibración 3 y 4, donde la línea de color azul corresponde al modelo de calibración 1 con un método de interpolación de primer orden donde el (C_l) para este caso tiene un valor máximo de 0,15 aproximadamente donde la frecuencia se hace estable, mientras que la línea de color rojo para la calibración 2 con el método de interpolación de segundo orden, el (C_l) toma un valor máximo 1,00 aproximadamente cuando la frecuencia de este parámetro se hace estable. La diferencia es más notoria para estos dos modelos esto se podría deber a que el timestep por cada iteración es mas pequeño que en la calibración 1 y 2, además porque el método interpolación de segundo orden capta menor error entre las iteraciones realizadas por Fluent.

En la figura 4.20 se observa que la línea de color azul, gráfica perteneciente a primer orden se estabiliza a las 2500 iteraciones y en la gráfica de color rojo que pertenece a segundo orden se estabiliza a las 350 iteraciones lo que se concluye que el flujo con este método se estabiliza en menor tiempo es decir asimila con mas brevedad los fenómenos producidos durante la simulación.

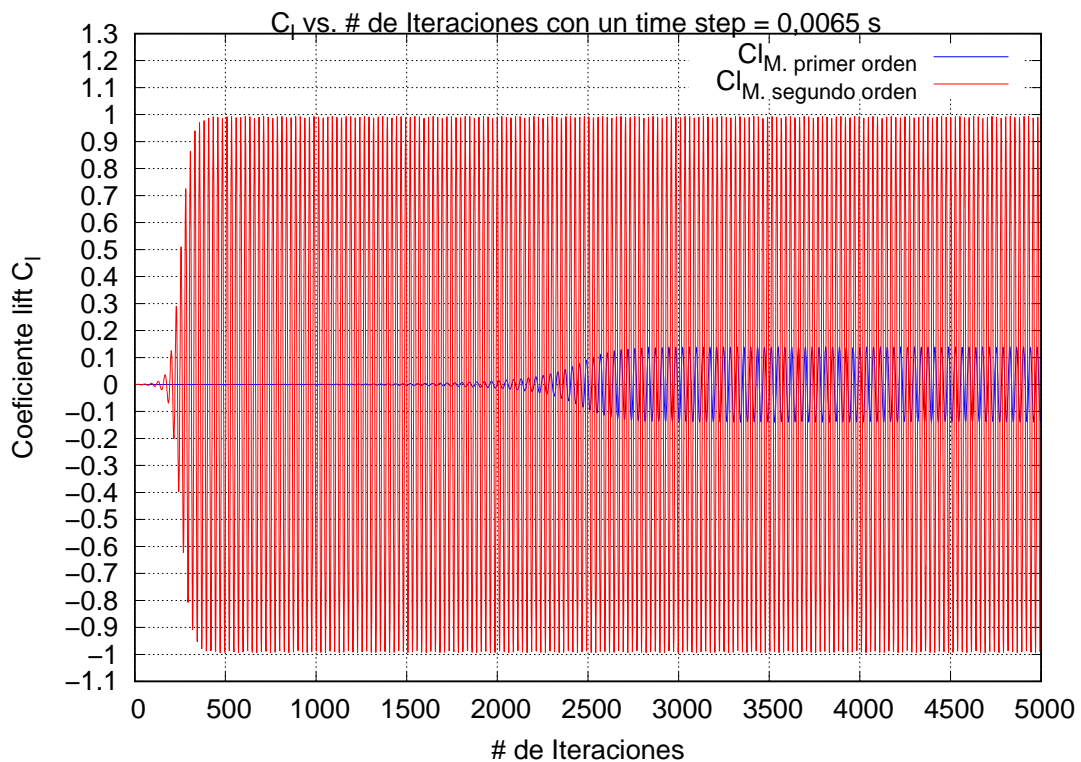


Figura 4.20: La gráfica muestra el comportamiento del coeficiente de sustentación para los modelos de calibración (calibración 3 (azul) y calibración 4 (rojo)), se usó diferentes métodos de interpolación, y la diferencia es significativa.

Fuente: Los Autores

4.3. ANÁLISIS DE AUTOCONVERGENCIA NUMÉRICA

El análisis de convergencia numérica cuantifica la similitud entre valores tanto de velocidades como de presiones a lo largo de los prototipos propuestos en cada uno de los casos simulados.

Para la interpretación de los resultados obtenidos con Fluent, un análisis de autoconvergencia numérica es presentada. Sin embargo, solo el modelo de calibración 4 donde el error relativo fue el menor que en los demás se tomó como referencia para este análisis en donde se fue modificando el mallado, tratando de conseguir que se duplique el número de celdas de manera secuencial.

Las condiciones iniciales para estos análisis fueron tomadas de la tabla 3.5, de esta manera los gráficos presentados a continuación, representan al C_l y C_d respectivamente.

En la gráfica de C_l se presentan 4 curvas diferentes y cada una de ellas corresponden al refinamiento que se realizó al mallado original, la curva de color azul corresponde a un número de celdas de 8200 fue con la que se trabajó en un principio para la calibración de resultados, la curva de color rojo una vez refinado el mallado se obtuvieron 16200 celdas, para visualizar cuanto cambian los resultados la curva de color negro con celdas se realizó con un valor de 47500 celdas donde se observa un cambio notable en cuanto a la variación del C_l en función del número de iteraciones realizadas y por último la curva de color verde tiene un refinamiento de mallado de 72900 celdas.

Al contrastar los resultados conforme la generación de las oscilaciones que tiene el fluido al pasar por el cilindro cada vez que se aumentan celdas alrededor del cilindro la captación de desprendimientos de vórtices es más notoria y es por ellos que se capta vorticidades a menor escala. Es por ello, que cuando el número de celdas es mayor, el valor del coeficiente de sustentación se hace más pequeño. Esto se lo puede explicar de la siguiente manera. Para los 4 casos el valor promedio del C_l es muy cercano a cero, sin embargo, al calcular la desviación estándar (σ)

entre los todos los valores para un número de celdas igual 8200 es $\sigma = 0,351$, para 16200 celdas es $\sigma = 0,346$, para 47500 celdas es $\sigma = 0,283$ y mientras para las 72900 celdas es $\sigma = 0,238$, con estos resultados podemos darnos cuenta que mientras incrementamos el número de celdas dentro de un volumen de control la dispersión de los resultados con respecto a la media aritmética serán cada vez pequeños convergiendo en otorgar mejores resultados.

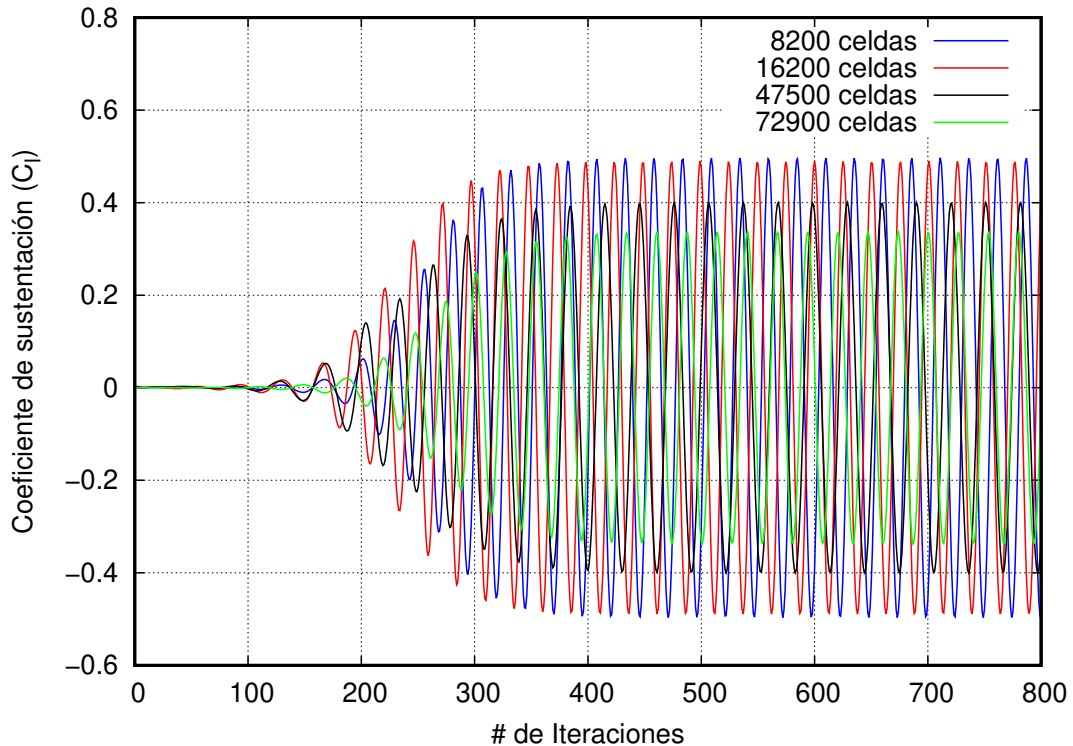


Figura 4.21: La autoconvergencia del coeficiente de sustentación están: (azul) curva para un número de celdas de 8200, (rojo) curva para un número de celdas de 16200, (negro) curva para un número de celdas de 47500, (verde) curva para un número de celdas de 72900.

Fuente: Los Autores

Mediante un análisis matemático presentado en la tabla 4.17, donde está el valor promedio calculado para todas las simulaciones realizadas. Así, para un número de 8200 celdas el valor promedio de $C_d = 1,355$ (línea azul), para 16200 celdas el valor promedio de $C_d = 1,350$ (línea roja), para 45700 celdas el valor promedio de $C_d = 1,303$ (línea negra) y para cuando son alrededor de las 72900 celdas el valor promedio de $C_d = 1,299$ (línea verde). Estos valores fueron promediados a partir de la iteración 400 a 1000, puesto que la frecuencia de variación del C_d se comporta de forma periódica.

A continuación, se presenta una gráfica para el coeficiente de dragado. Para la autoconvergencia numérica del C_d , el criterio para el refinamiento de grilla es el mismo, donde las curvas son similares y las condiciones iniciales son las mismas. Las curvas de color azul y roja son similares en cuanto a la frecuencia de desprendimiento de vórtices, el coeficiente de dragado converge en la iteración cerca a 300, con un valor del $C_d \sim \pm 0,40$. En las curvas de color negro y verde, el número de celdas son 5 veces y 9 veces respectivamente al número inicial que fueron con 8200 celdas, así mismo el valor converge en las simulaciones y de igual manera la oscilación que tienen estas dos curvas son semejantes.

Para poder tener un valor aproximado al real, se debe aumentar el número de celdas en la grilla y realizar el análisis numérico.

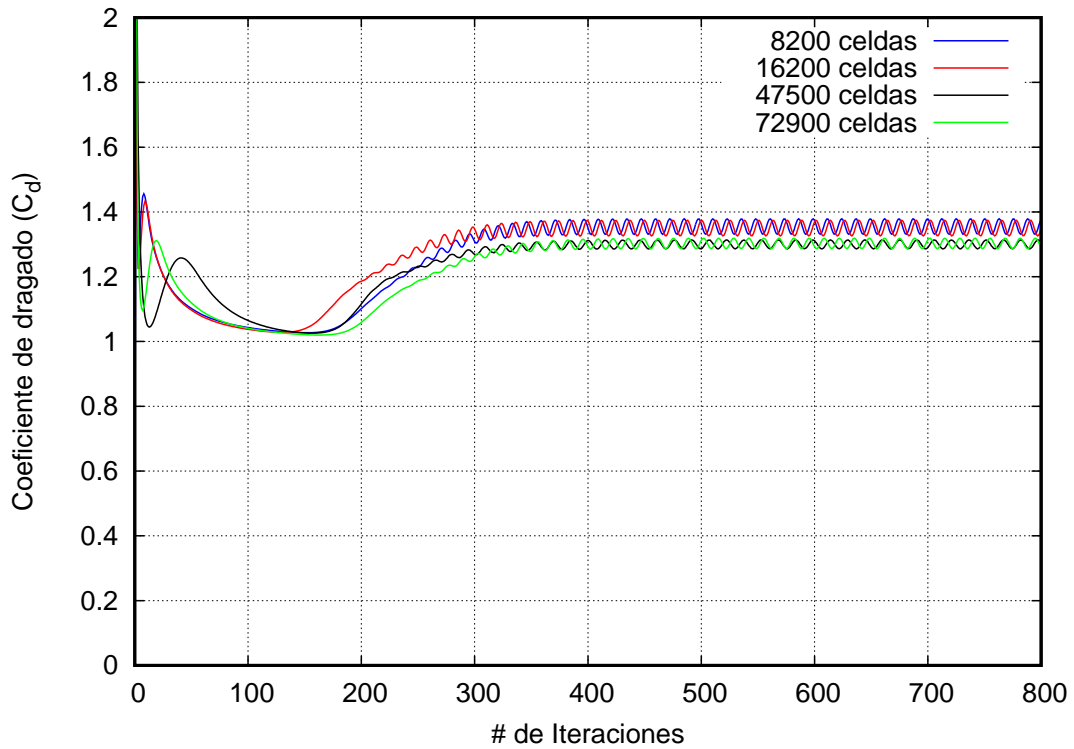


Figura 4.22: La autoconvergencia de dragao muestra la curva (azul) para un número de celdas de 8200, curva (rojo) para un número de celdas de 16200, curva (negro) para un número de celdas de 47500, curva (verde) para un número de celdas de 72900, a partir de la iteración 300 el valor de C_d empieza a mantenerse.

Fuente: Los Autores

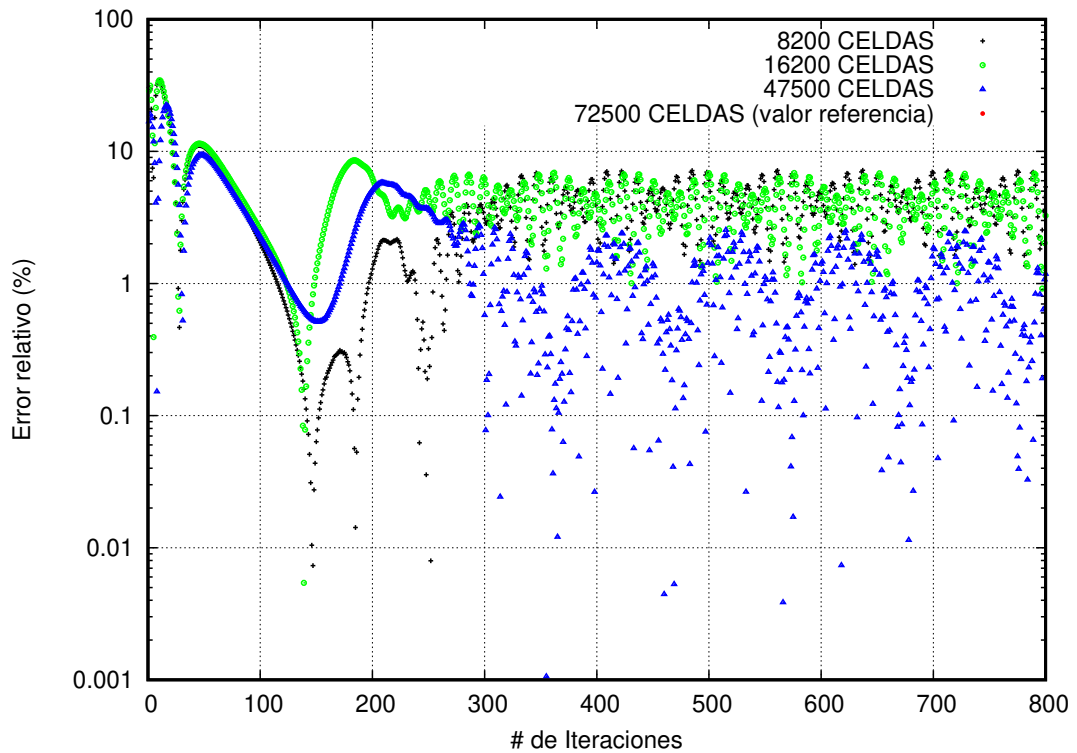


Figura 4.23: Error relativo de la dispersión de los resultados del C_d de la autoconvergencia.

Fuente: Los Autores

En la figura 4.23, la dispersión de los puntos indican el error relativo alcanzado por los resultados en función al valor obtenido con las 72500 celdas, es así que, el error máximo obtenido es del 10 % aproximadamente para un

número de celdas de 8200, y mientras se incrementa el número de celdas a 16200 su error baja y cuando llegan a ser 47500 celdas es cuando se evidencia una dispersión de puntos alrededor del $\sim 1\%$.

Tabla 4.17: Resultados del análisis de autoconvergencia de coeficiente de dragado de modelo de calibración 4.

Número de celdas	$\overline{C_d}$	Error relativo	Error relativo de autoconvergencia
8200	1,3549	4,237 %	$\sigma = 0,0168$
16200	1,3503	3,877 %	$\sigma = 0,0171$
45700	1,3027	0,215 %	$\sigma = 0,0113$
72900	1,2999	0,00 %	$\sigma = 0,0096$

Fuente: Los Autores

De la misma manera, el C_d mantiene una desviación estándar baja como muestra la tabla 4.17, en la columna de este valor, donde cuanto mayor sea el número de celdas en el volumen de control, la dispersión de los resultados está más cerca del valor de la media aritmética calculada, permitiendo tener datos aceptables.

4.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE LOS MODELOS DE ESTUDIO

Se presenta a continuación los análisis de estudios para las perfiles con formas primitivas que se tomaron como referencia así como los perfiles de los autobuses, mostrando resultados del coeficiente de dragado y sustentación para posteriormente realizar su interpretación de resultados.

4.4.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE MODELOS GEOMÉTRICOS SEMEJANTES A AUTOBUSES Y MODELOS GEOMÉTRICOS DE AUTOBUSES

Los resultados obtenidos serán presentados mediante gráficas y tablas, del coeficiente de dragado para los modelos (RSR) y (RCR), donde las condiciones iniciales del fluido fueron como gas ideal y sin considerar modelos de turbulencia. En esta primera parte se consideran todos los modelos con la velocidad de 90 km h^{-1} y se comparan los datos obtenidos.

En la figura 4.24, la curva del C_d para los casos de las geometrías semejantes a las carrocerías de hoy en día. La curva de color azul representan los datos obtenidos del modelo de rectángulos sin redondeos (ver tabla 3.11), donde el valor de los picos llegan a un valor máximo de 5,534, mientras cuando se realiza un redondeo en las esquinas al rectángulo (ver tabla 3.11), el valor disminuye teniendo el pico más alto de 2,398, es así se produce una reducción de alrededor de 56,70 %. Con estos resultados se tiene la idea de cuanto debe bajar el C_d para los demás casos.

Se observa en la gráfica de color azul que existen muchas fluctuaciones es decir el valor del coeficiente de dragado no se estabiliza debido a que la geometría del perfil presenta una geometría con aristas vivas mientras que la gráfica de color verde se observa que las fluctuaciones no son tan grandes esto se debe a que el flujo puede seguir su trayectoria sin que se genere altas de presión.

A continuación, en la tabla 4.18, están gráficas de presión a diferentes tiempos, para poder comparar los resultados se presenta al final de la tabla una escala de colores. La variación del tiempo va desde los 2 [s] hasta los 32 [s].

La presencia de presiones bajas sobre la geometría cerca de la mitad tanto para RSR Y RCR son evidentes, sin em-

bargo, en el caso RSR estas son más frecuentes, incluso hasta llegas al borde posterior de la geometría. Así mismo los gráficos representan el módulo de vorticidad que genera a medida que transcurre el tiempo de simulación.

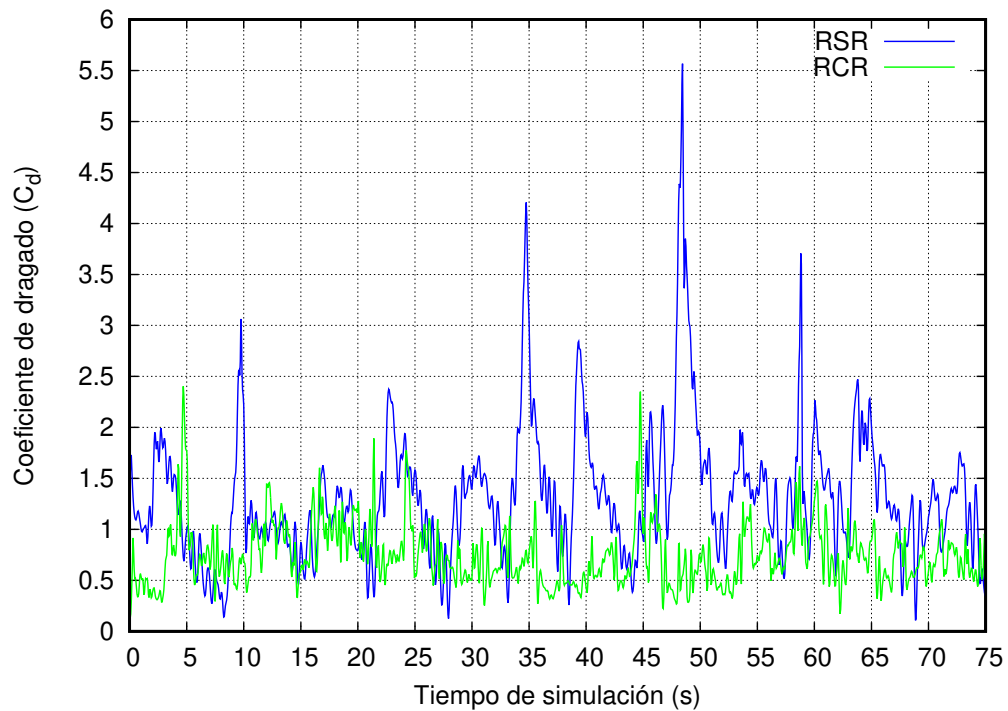


Figura 4.24: El coeficiente de dragado para el rectángulo sin redondeos en sus vértices su valor es mayor, mientras para el rectángulo es inferior.

Fuente: Los Autores

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de dragado para los modelos M1 y M2. En esta primera parte se consideran todos los modelos con la velocidad de 90 km h^{-1} .

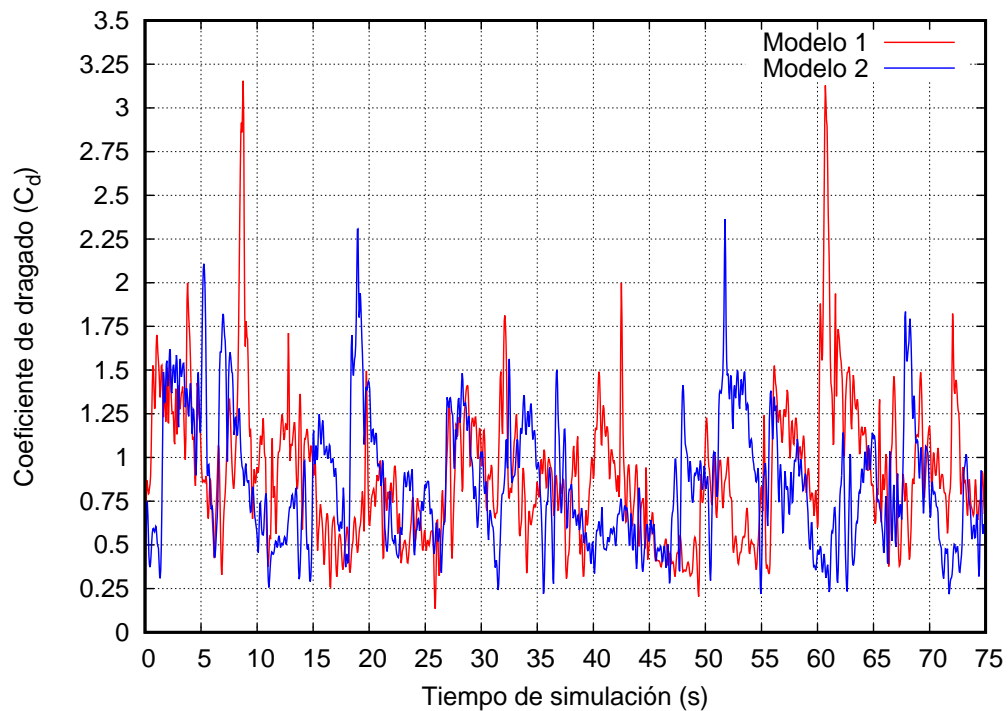
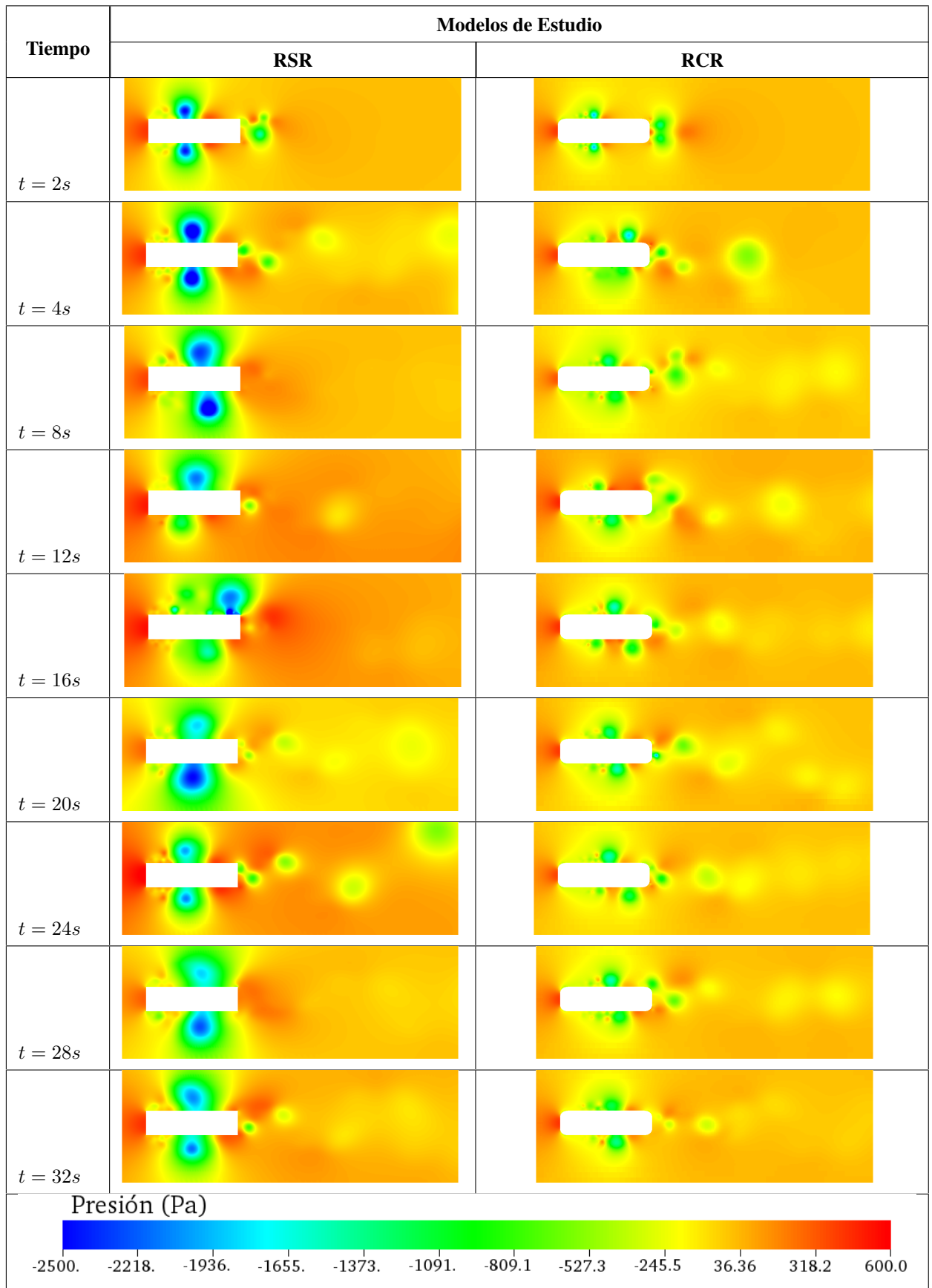


Figura 4.25: El modelo 1 presenta mayor coeficiente de dragado que el modelo 2 para este análisis preliminar.

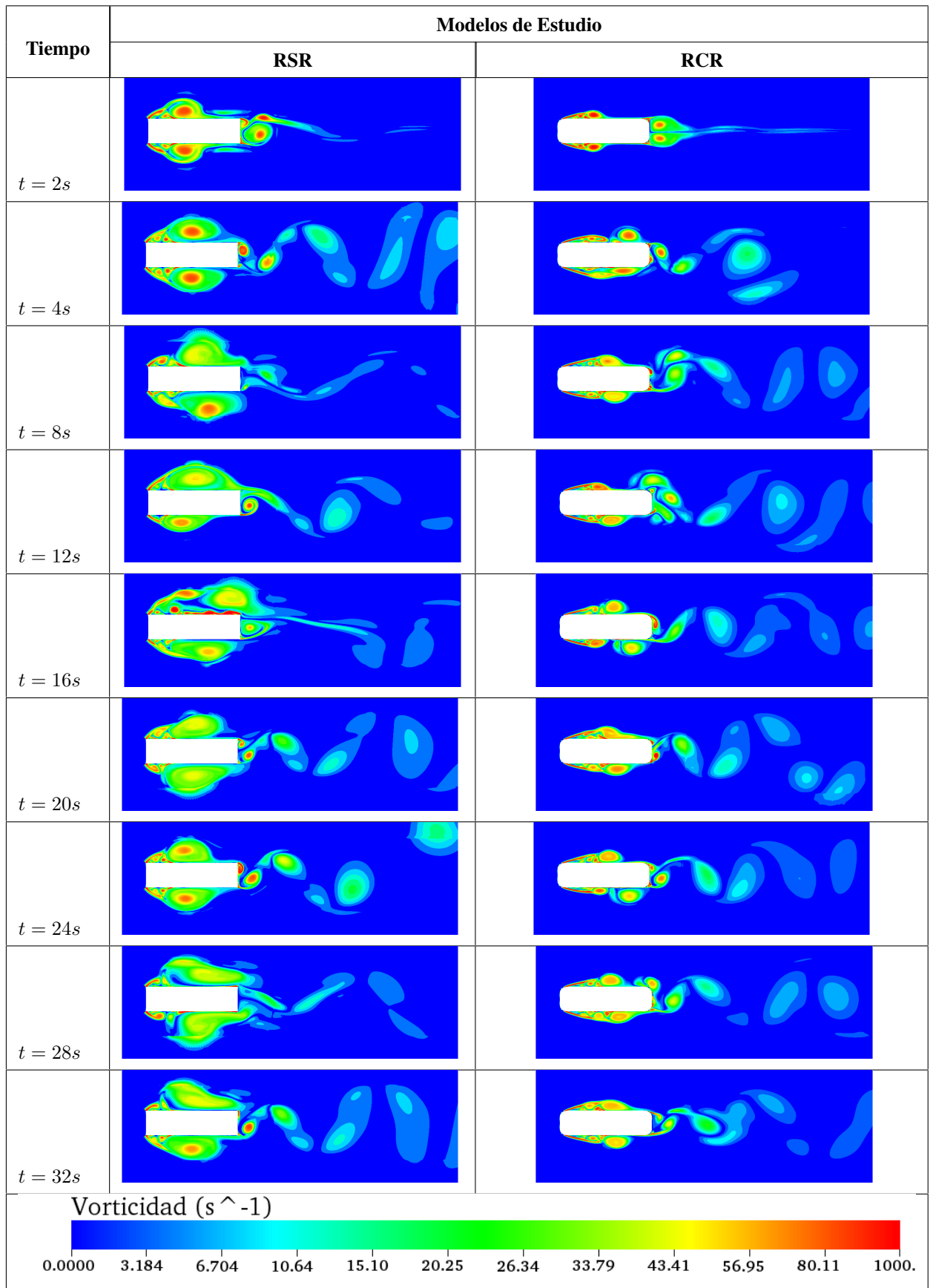
Fuente: Los Autores

Tabla 4.18: Presión a diferentes tiempos de los modelos RSR y RCR con velocidad a 90 km h^{-1} .



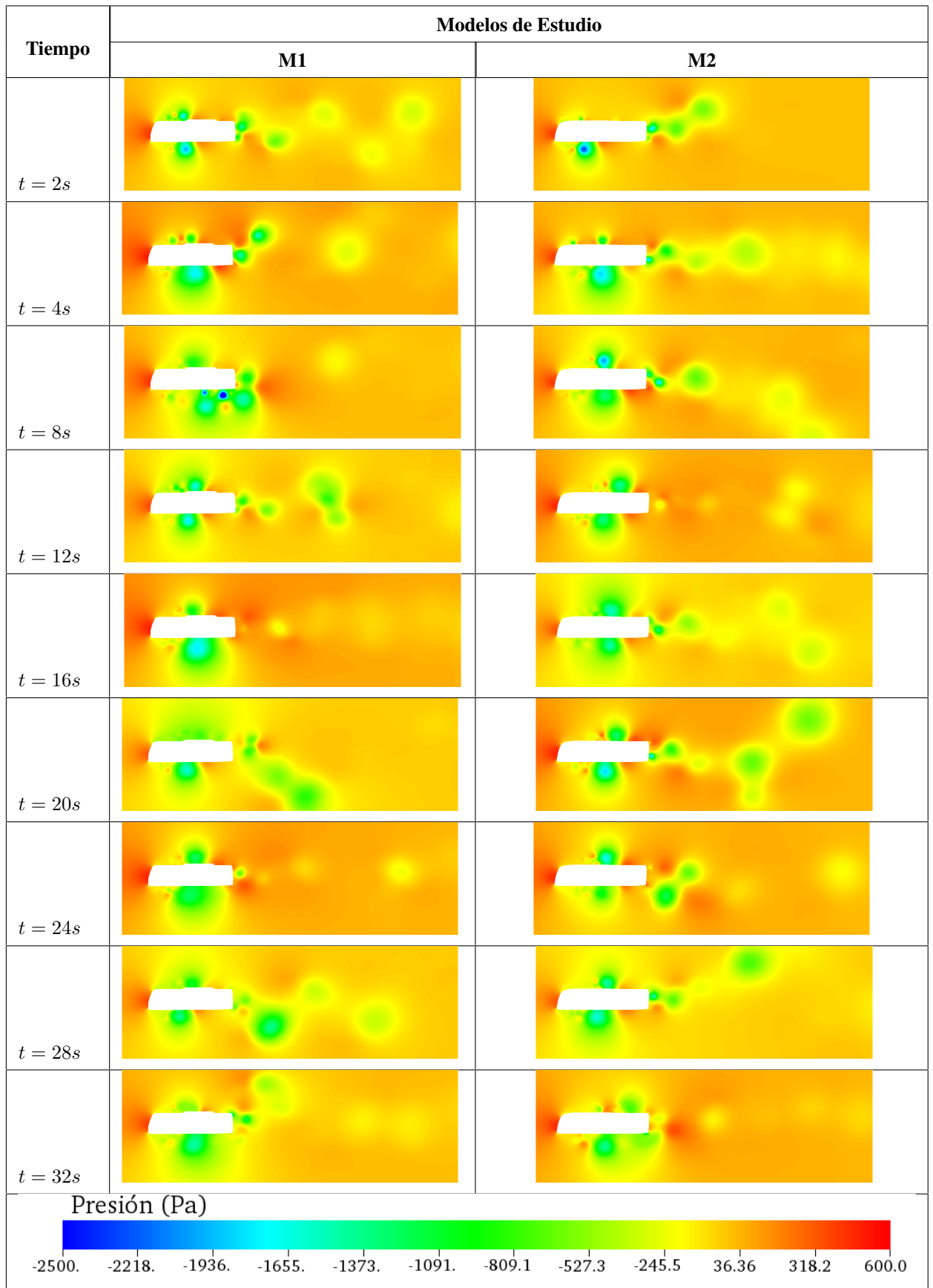
Fuente: Los Autores

Tabla 4.19: Vorticidad a diferentes tiempos de los modelos RSR y RCR con velocidad a 90km h^{-1} .



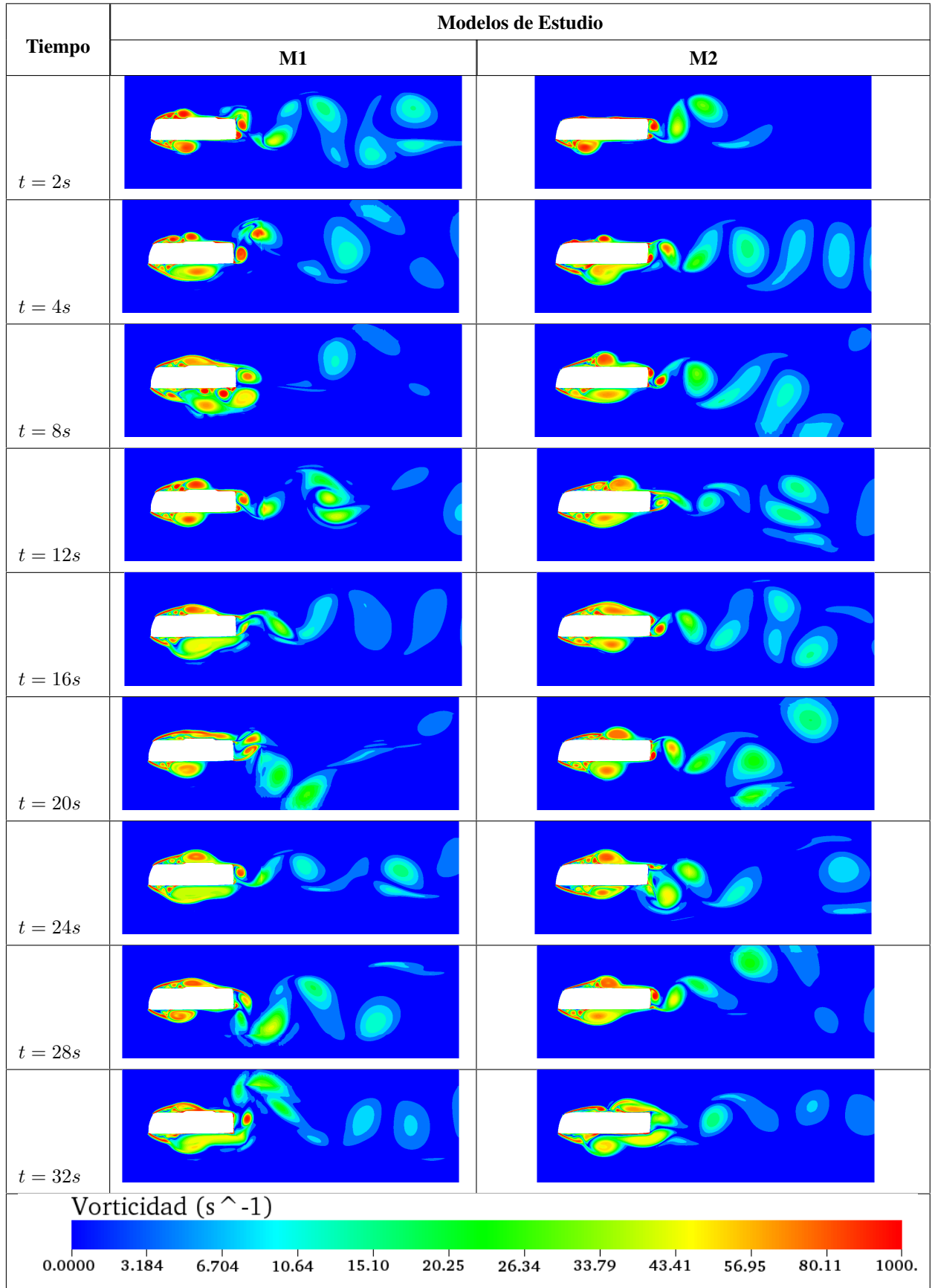
Fuente: Los Autores

Tabla 4.20: Presión a diferentes tiempos de los modelos M1 y M2 con velocidad a 90km h^{-1} .



Fuente: Los Autores

Tabla 4.21: Vorticidad a diferentes tiempos de los modelos M1 y M2 con velocidad a 90 km h^{-1} .



Fuente: Los Autores

En la figura 4.25, está la curva del C_d para los modelos de carrocerías seleccionadas. La curva de color rojo representa los datos obtenidos del modelo 1, llegando a tener un valor de 3,20, mientras para el modelo 2, el valor disminuye hasta 2,375 siendo un 25,78 % menor al modelo 1.

Para la tabla 4.20, las gráficas que muestran el comportamiento de la presión en los modelos M1 y M2, existe la presencia de zonas de baja presión en la parte posterior y zonas de alta presión en la parte frontal. La formación de vórtices es mayor en la parte posterior de las carrocerías (ver tabla 4.21), donde existe el desprendimiento de las líneas de flujo alrededor de la geometría del M1, para el M2 el desprendimiento de vórtices se realiza de forma casi simétrica.

A continuación en la tabla 4.22, se comparan los resultados obtenidos de los C_d para los modelos de estudio, donde se promedia el C_d de todos los modelos y se calcula un valor de error relativo entre el valor más bajo obtenido.

El modelo RCR tiene un C_d más bajo que todos, sin embargo, comparando los dos modelos de carrocerías seleccionados, el M2 es quien registra un menor C_d , aunque la diferencia entre el modelo M1 y M2 es del 7 %.

Tabla 4.22: Comparación de resultados de C_d para los modelos de estudios.

Modelo estudio	$\overline{C_d}$	Incremento porcentual	Desviación estándar
RSR	1,3093	78,15 %	$\sigma = 0,627$
RCR	0,7349	0,00 %	$\sigma = 0,283$
M1	0,8645	17,63 %	$\sigma = 0,393$
M2	0,8106	10,30 %	$\sigma = 0,368$

Fuente: Los Autores

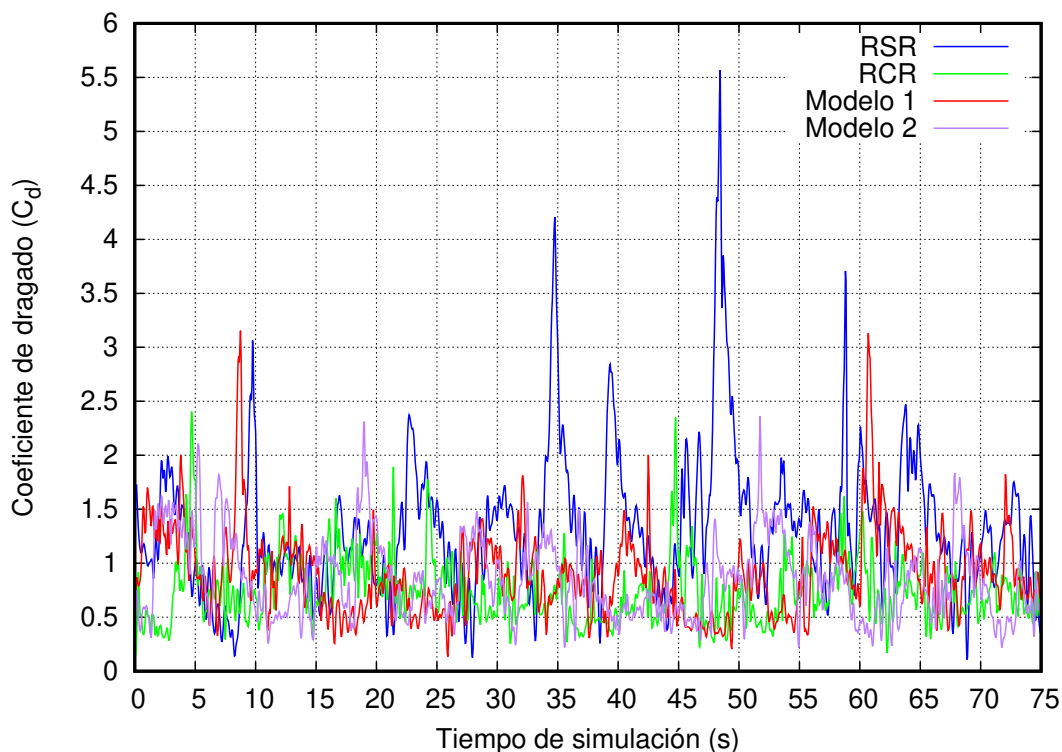


Figura 4.26: La figura muestra el coeficiente de dragado en función del tiempo para los modelos de estudio, siendo mayor el modelo RSR y el menor el modelo M2.

Fuente: Los Autores

En la figura 4.26, muestra el valor del C_d para todos los modelos de estudio, donde los valores altos son para el

modelos RSR por tener aristas vivas en su vértices, el valor de C_d para el modelo RCR es menor; el M1 y M2 se comportan de mejor manera por su geometría externa disminuyendo el C_d con el tiempo.

4.4.2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE MODELOS GEOMÉTRICOS DE AUTOBUSES A DIFERENTES VELOCIDADES

A continuación, en las tablas 4.23 y 4.27, M1 y M2 respectivamente realizamos una comparación de los modelos de carrocerías seleccionadas para el estudio, a diferentes velocidad de 90 km h^{-1} , 100 km h^{-1} y 120 km h^{-1} , y describimos el comportamiento general en un instante de tiempo.

En la tabla 4.24 y 4.28, se presentan las figuras del módulo de vorticidad a las diferentes velocidades de los modelos M1 y M2 respectivamente.

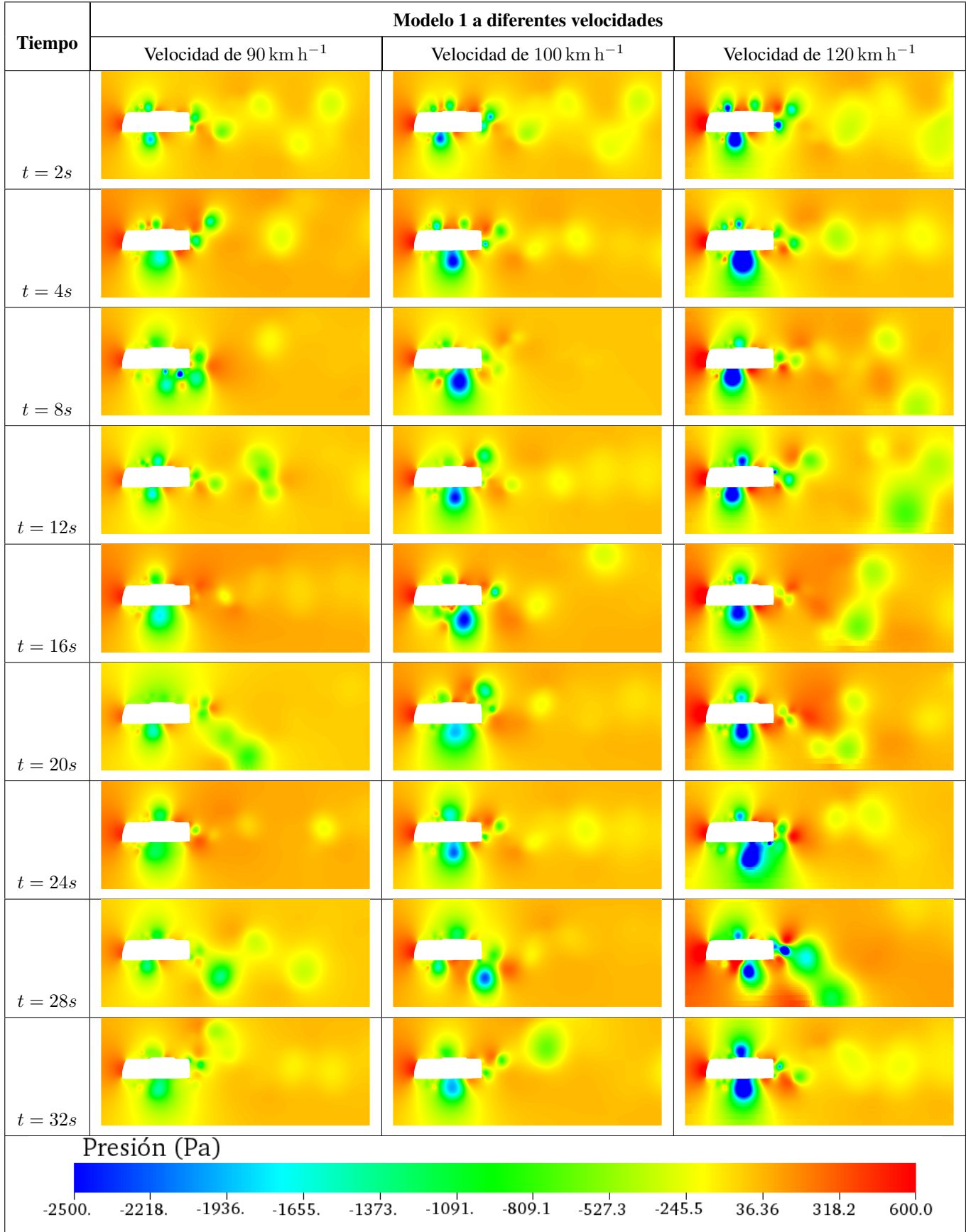
4.4.2.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 A DIFERENTES VELOCIDADES

Las tablas siguientes muestran los estados en que se encuentra el M1 en las variables de presión y vorticidad. Es así que la presión en ciertas zonas son más altas que en otras, el modelo 1 al incrementar la velocidad del fluido a 120 km h^{-1} tiene mayor presencia de zonas de baja presión específicamente en la mitad de la geometría por la parte superior e inferior de mismo, donde el valor llega hasta -2500 Pa , la presión está tomada con valor de referencia a la atmosférica, sin embargo, la presencia de zonas de alta presión también son visibles en el frente y la parte posterior de la carrocería llegando la presión estática a 600 Pa , en la simulación a 120 km h^{-1} se nota de mejor manera lo expresado.

En la tabla 4.23, el cambio de la presión de como ocurre con respecto al tiempo es notable desde los 2 primeros segundos, donde a 90 km h^{-1} la formación de zonas de presión son pequeñas y estas aumentan de tamaño mientras el fluido incrementa de velocidad como es el caso de 100 km h^{-1} y 120 km h^{-1} . A la velocidad de 90 km h^{-1} las zonas de baja presión son más evidentes gráficamente, ya que también generan las zonas de alta presión, es por ello que, este fenómeno con el cambio de velocidad se hace cada vez notoria, donde la carrocería al estar expuesta a 120 km h^{-1} de velocidad, sufre variaciones significativas que a menor velocidad, haciendo entender que la formación de zonas bajas y altas de presión ocurren al aumentar la velocidad del fluido que circula alrededor de la geometría.

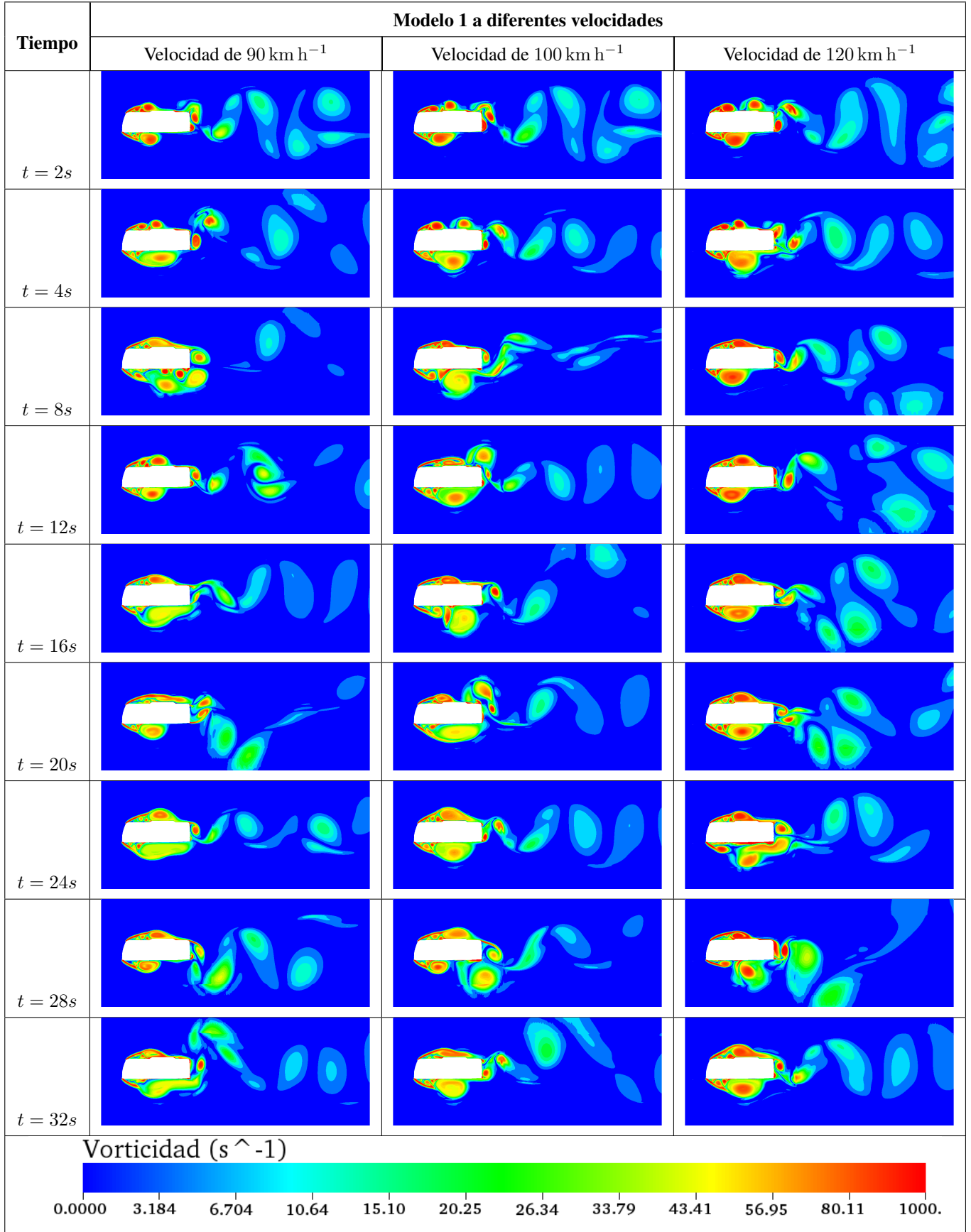
Mientras, en la tabla 4.24, se compara la vorticidad que se crea alrededor de la geometría de la carrocería para el modelo M1, es así, los desprendimientos de flujo que se forman en la parte posterior, se incrementan al aumentar la velocidad. De la misma manera, para la velocidad de 120 km h^{-1} es evidente la mayor presencia de vórtices tanto en la parte superior como inferior de la geometría.

Tabla 4.23: Presión a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades.



Fuente: Los Autores

Tabla 4.24: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades.



Fuente: Los Autores

Con un análisis cualitativo de las gráficas los resultados no son muy claros, es por ello que, se realiza un análisis matemático del C_d para el M1 a diferentes velocidades y a continuación, se presenta la figura 4.27, el C_d a diferentes velocidades y con ello poder entender el comportamiento general del M1.

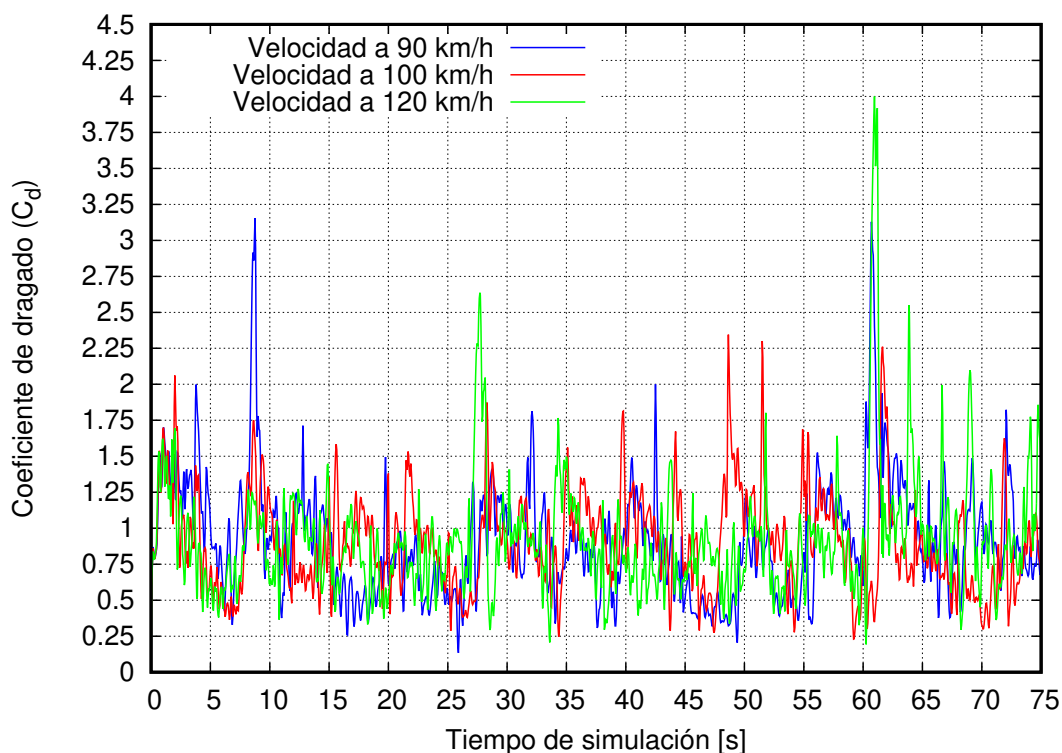


Figura 4.27: Coeficiente de dragado C_d de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.25: Comparación de C_d para el M1 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{C_d}$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h^{-1}	0,8645	00,00 %	$\sigma = 0,3641$
100 km h^{-1}	0,9102	5,29 %	$\sigma = 0,3724$
120 km h^{-1}	0,9520	10,12 %	$\sigma = 0,4070$

Fuente: Los Autores

Para este caso el incremento porcentual del C_d está en función de la velocidad a 90 km h^{-1} para interpretar qué sucede mientras incrementamos la velocidad de flujo del fluido. El C_d para la velocidad de 90 km h^{-1} es 0,8645 y mientras se incrementa la velocidad del fluido el incremento porcentual es de 5 % aproximadamente y 10 % para velocidades de 100 y 120 km h^{-1} respectivamente. Por tanto concluimos que al incrementar el valor de la velocidad del fluido, la resistencia del aire también se incrementará como muestra la tabla de resultados.

Una vez obtenido los valores de C_d a diferentes velocidades es posible calcular el valor de la fuerza que se produce por acción de coeficiente de dragado. Así, la figura 4.3, representa la fuerza de dragado y la tabla 4.26, presenta el valor promedio de este parámetro y el incremento que tiene al aumentar la velocidad.

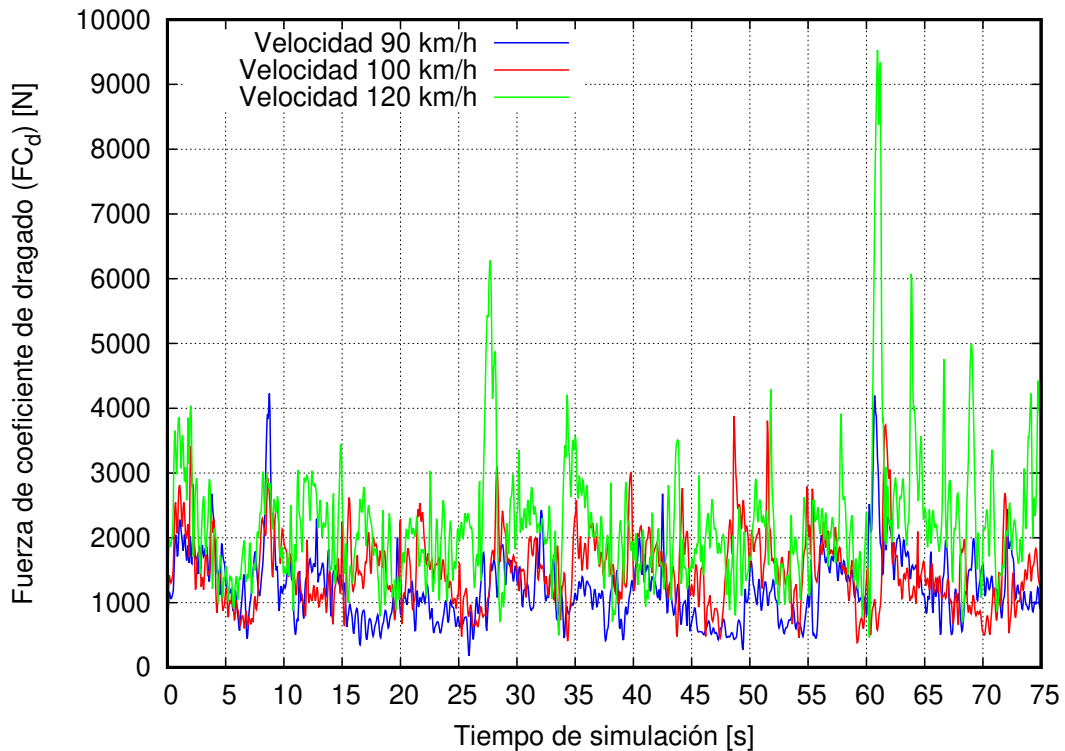


Figura 4.28: Fuerza de dragado (F_d) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.26: Comparación de fuerza de dragado (F_d) para el M1 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{F_d}[N]$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h^{-1}	1158,958	00,00 %	$\sigma = 488,52[N]$
100 km h^{-1}	1506,473	29,99 %	$\sigma = 619,32[N]$
120 km h^{-1}	2268,899	95,77 %	$\sigma = 969,78[N]$

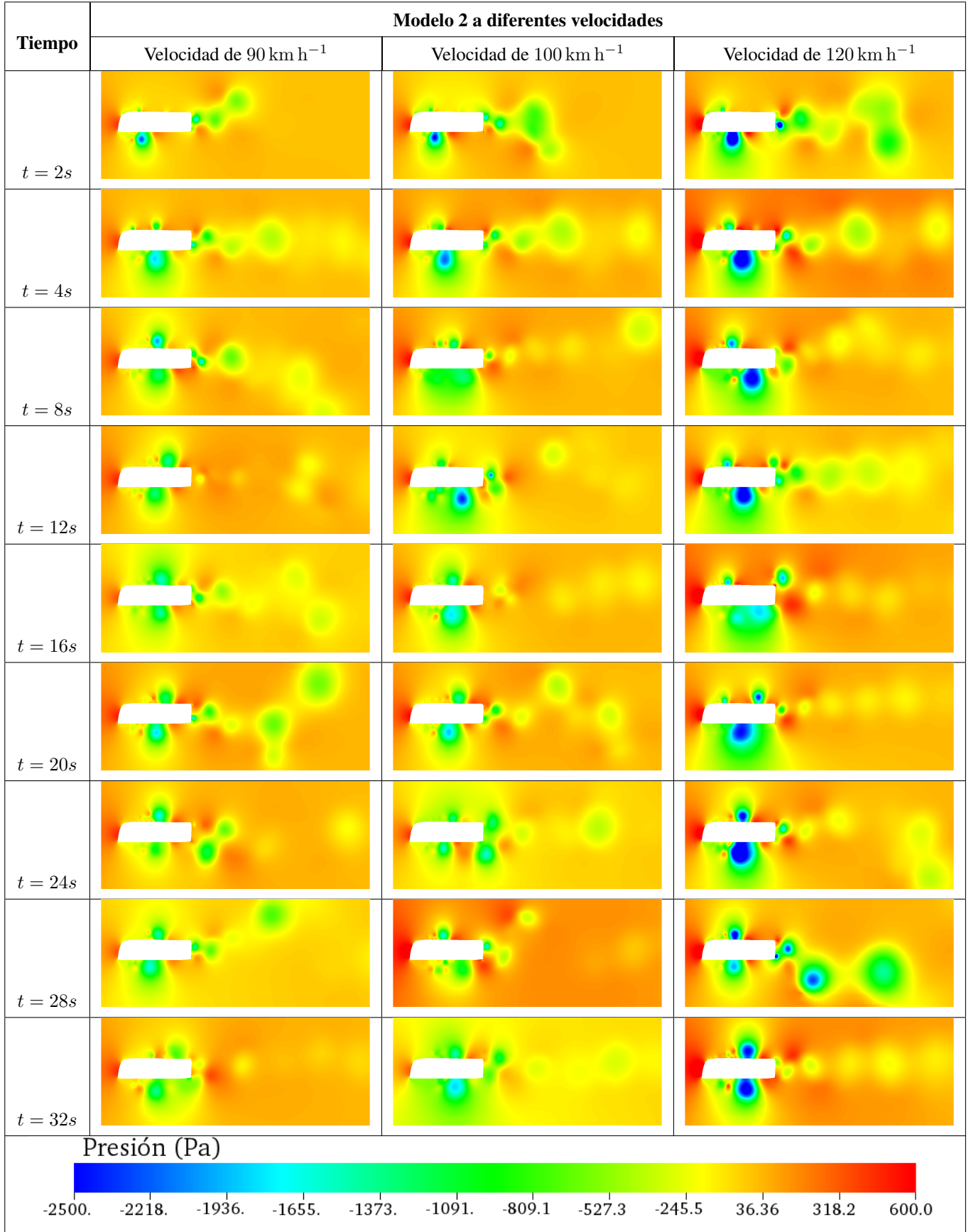
Fuente: Los Autores

En este caso la fuerza de dragado presentada en la tabla 4.26, muestra el incremento al aumentar la velocidad del fluido, y prueba de eso se debe a su desviación estándar que tienen los resultados con respecto a la media aritmética; esto también, puede deberse a los picos altos presenten en todo el tiempo que tiene cada una de las curvas, otra razón por la cual varían los resultados se deben a que no se consideró los modelo de turbulencia que puede obviar el software al resolver las ecuaciones.

4.4.2.2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 A DIFERENTES VELOCIDADES

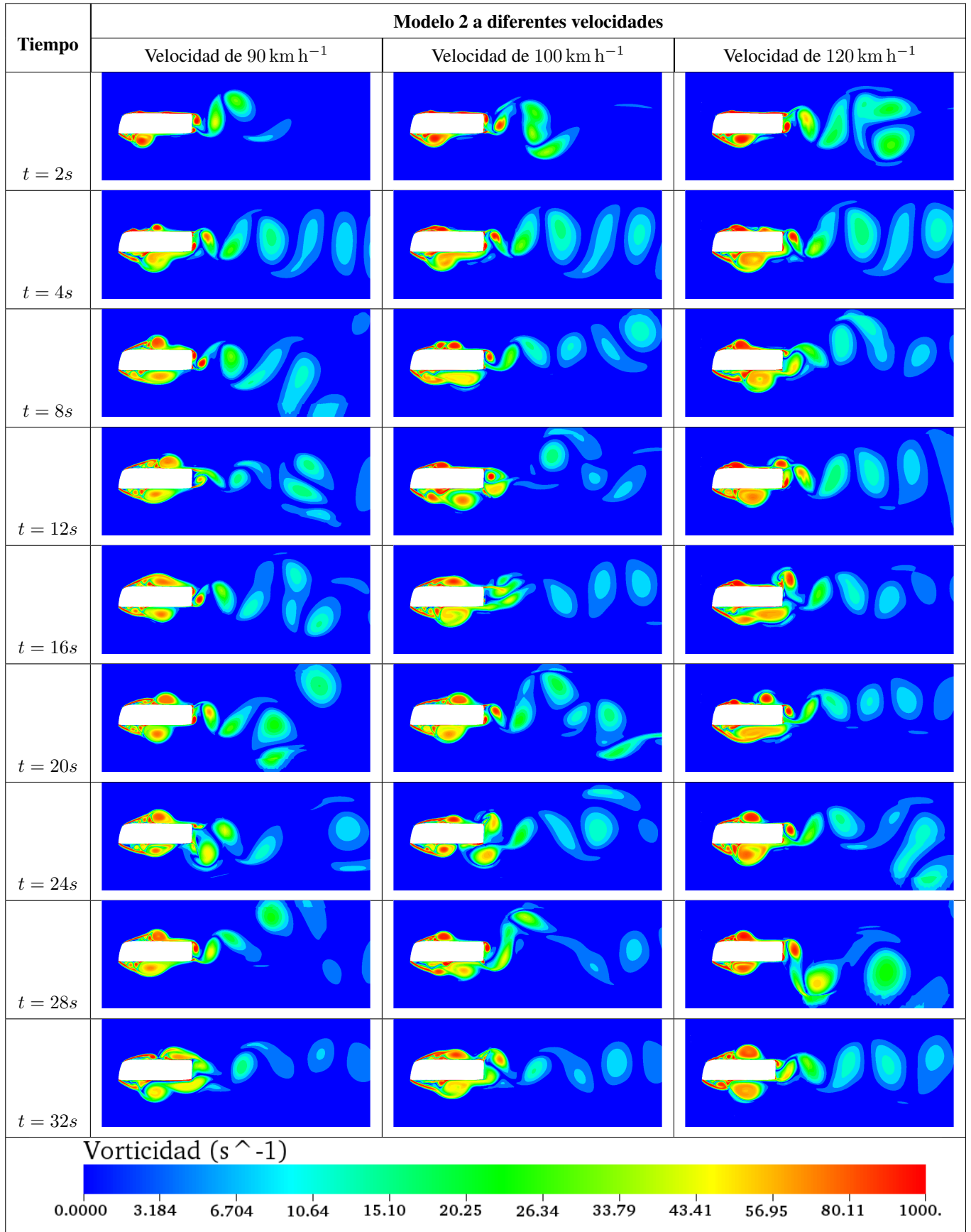
A continuación, se presentan las gráficas de los resultados obtenidos para el modelo 2 en análisis, la variable de presión y vorticidad con la misma escala para las tres velocidades y entender de su comportamiento general a lo largo del tiempo.

Tabla 4.27: Presión a diferentes tiempos de modelo 2 a diferentes velocidades.



Fuente: Los Autores

Tabla 4.28: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades.



Fuente: Los Autores

El M2 presenta resultados del coeficiente de dragado y la fuerza de dragado como el M1. Es así, que para poder comparar los resultados se generan figuras de las curvas y el valor promedio, analizando de forma matemática.

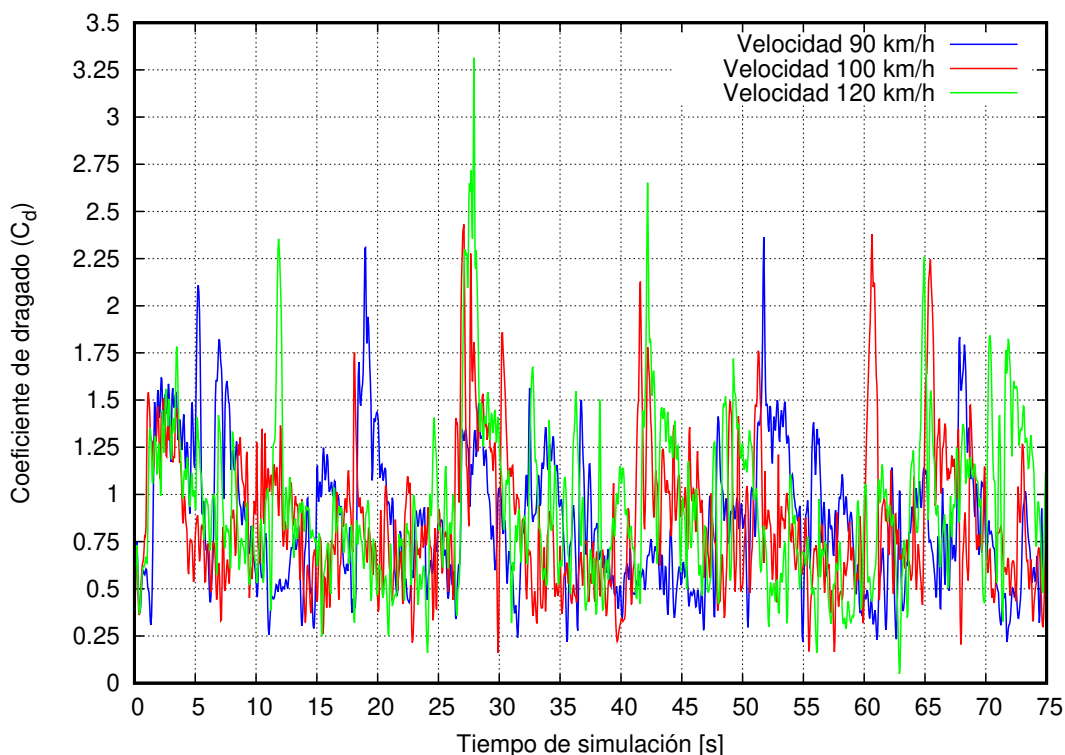


Figura 4.29: Coeficiente de dragado (C_d) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.29: Comparación de coeficiente de dragado (C_d) para el M2 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{C_d}$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h^{-1}	0,8106	00,00 %	$\sigma = 0,348$
100 km h^{-1}	0,8382	3,40 %	$\sigma = 0,378$
120 km h^{-1}	0,8775	8,25 %	$\sigma = 0,411$

Fuente: Los Autores

El estudio numérico para el M2, presenta resultados donde al aumentar la velocidad del fluido el C_d aumenta en 3,40 % al pasar de los 90 km h^{-1} a 100 km h^{-1} , mientras, al estar expuesto a velocidad de 120 km h^{-1} este valor se incrementa en 8,25 % tomado el valor del C_d a 90 km h^{-1} como referencia para este análisis. De acuerdo, a los resultados obtenidos con este tipo de carrocería, fue diseñada para tener una menor resistencia cuando sea expuesta a grandes velocidades en carreteras y por ende tenga un menor consumo de combustible, mismo que será analizado más adelante.

En la tabla 4.30, se muestra el valor de la fuerza de dragado para el M2, donde el incremento porcentual hace evidente que al incrementar la velocidad, que a diferencia del M1, esta fuerza es menor, así mismo, se presenta la fluctuación que generan la curva para este análisis.

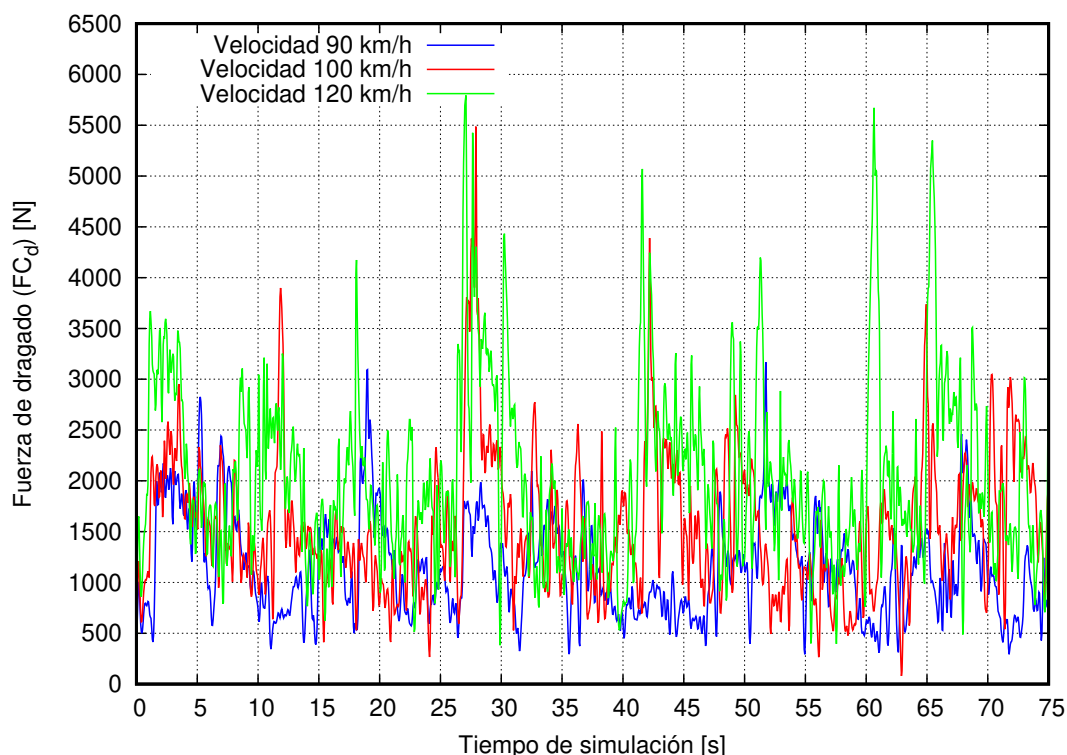


Figura 4.30: Fuerza de dragado (F_d) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.30: Comparación d la fuerza de dragado (F_d) para el M2 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{F_d}[N]$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h^{-1}	1086,73	00,00 %	$\sigma = 466,68[N]$
100 km h^{-1}	1452,49	33,66 %	$\sigma = 900,62[N]$
120 km h^{-1}	1997,29	83,79 %	$\sigma = 681,03[N]$

Fuente: Los Autores

En los resultados obtenidos para la fuerza de dragado, incrementa su valor en 33,60 % cuando la velocidad se incrementa de 90 km h^{-1} a 100 km h^{-1} . Esto indica que la resistencia del aire genera sobre la geometría de la carrocería es mayor, esto también se nota cuando la velocidad se cambia a 120 km h^{-1} donde el incremento de la fuerza de dragado es aproximadamente de 84 %. La dispersión de los datos obtenidos también influyen en que se tenga un valor promedio alto, prueba de ello es su desviación estándar para los resultados obtenidos.

Lo mismo se evidencia en la figura 4.4.2.2, cuando las curvas tienen más picos altos cuando la velocidad se incrementa haciendo que la fuerza presenta fluctuaciones marcadas con el pasar del tiempo. Estos resultados también responden al hecho de no haber considerado modelos de turbulencia que en la siguiente sección del estudio se implementan y analizan.

4.5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO MEDIANTE EL USO DEL MODELO DE TURBULENCIA ($\kappa - \epsilon$)

4.5.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1.

Existen varios modelos de turbulencia para el análisis de flujos turbulentos y muchos de ellos se dividen en categorías conforme a esto. El modelo de turbulencia que se ha utilizado, usa menos aproximaciones, lo cual hace que el método permita tener resultados aproximados a la realidad, pero a un alto costo computacional. El modelo de turbulencia ($\kappa - \epsilon$) es el más utilizado a nivel comercial cuando de fluidos se trata. En dicho caso, se entiende que el flujo es totalmente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables.

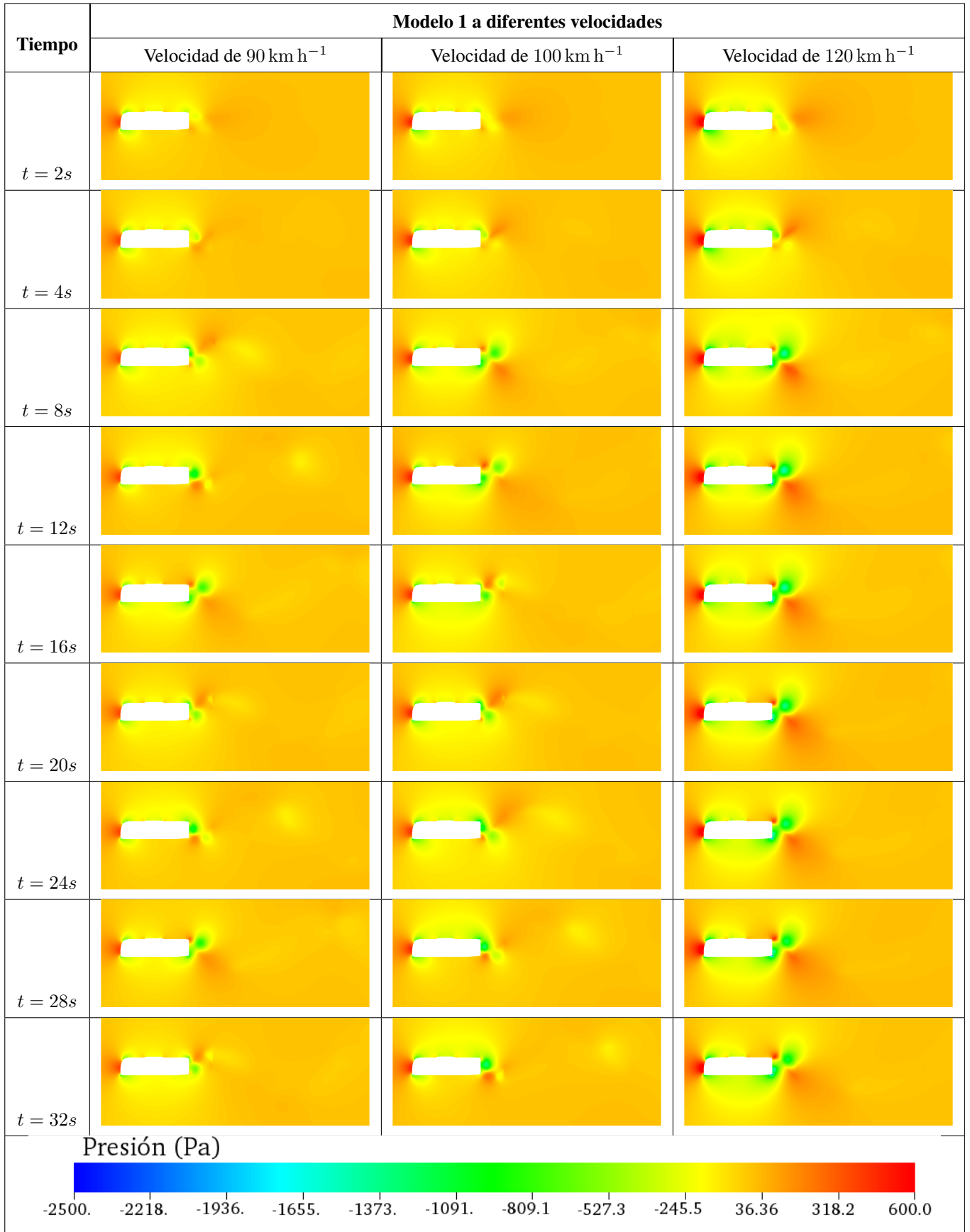
A continuación, se presenta gráficas del comportamiento del modelo 1 y 2 con dicho modelo de turbulencia, tanto de presión como de vorticidad.

Para entender como afecta el modelo de turbulencia a los resultados del análisis fue necesario mantener la escala antes establecida para los prototipos sin modelos de turbulencia.

Para el modelo 1 la presión se mantuvo la escala desde -2500 Pa hasta 600 Pa, dicha presión es presión estática donde el valor de 0 Pa corresponde la presión atmosférica establecida como condición inicial en todos los modelos de análisis. Como se puede evidenciar en la tabla 4.31, las zonas de altas y bajas presiones disminuyeron al implementar el modelo de turbulencia. Comparando con la tabla 4.23, los cambios se deben a la mayor captación de variaciones de presión.

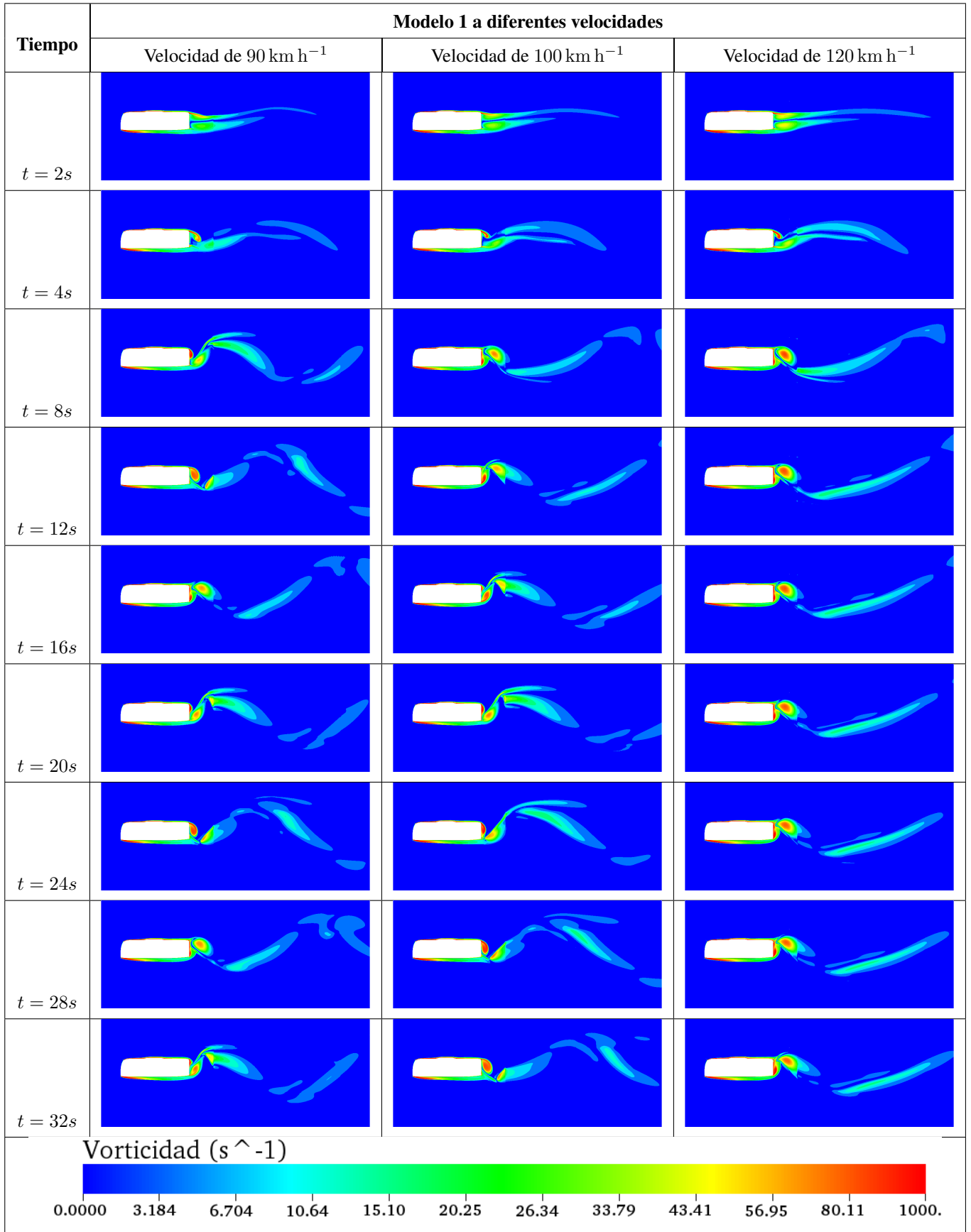
De igual manera para la vorticidad la escala estuvo entre 0 a 1000 s^{-1} , para comparar estas gráficas con las mostradas en la tabla 4.24, donde la formación de vórtices en la parte posterior de la geometría fue más evidente, mientras que al manejar un modelo de turbulencia estos vórtices disminuyeron y solo se evidencia pequeñas fluctuaciones en la parte posterior.

Tabla 4.31: Presión a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.



Fuente: Los Autores

Tabla 4.32: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.



Fuente: Los Autores

Con el modelo de turbulencia ($\kappa - \epsilon$) usado para captar las pequeñas variaciones internas que se producen en las celdas de la malla, el software intenta calcular esas variaciones de vorticidad que se crean en donde el tamaño de celda no es lo suficientemente pequeño y este interpola estos valores para tener una mayor estabilidad en cuanto a resultados.

Es así, se vuelve a realizar un análisis matemático de los resultados obtenidos y presentar el comportamiento de los modelos en estudio, en primer lugar está el M1. A continuación, se presenta la figura 4.31 el C_d y la tabla 4.33 para el C_d promedio con su incremento porcentual en base al que se produce a 90 km h^{-1} .

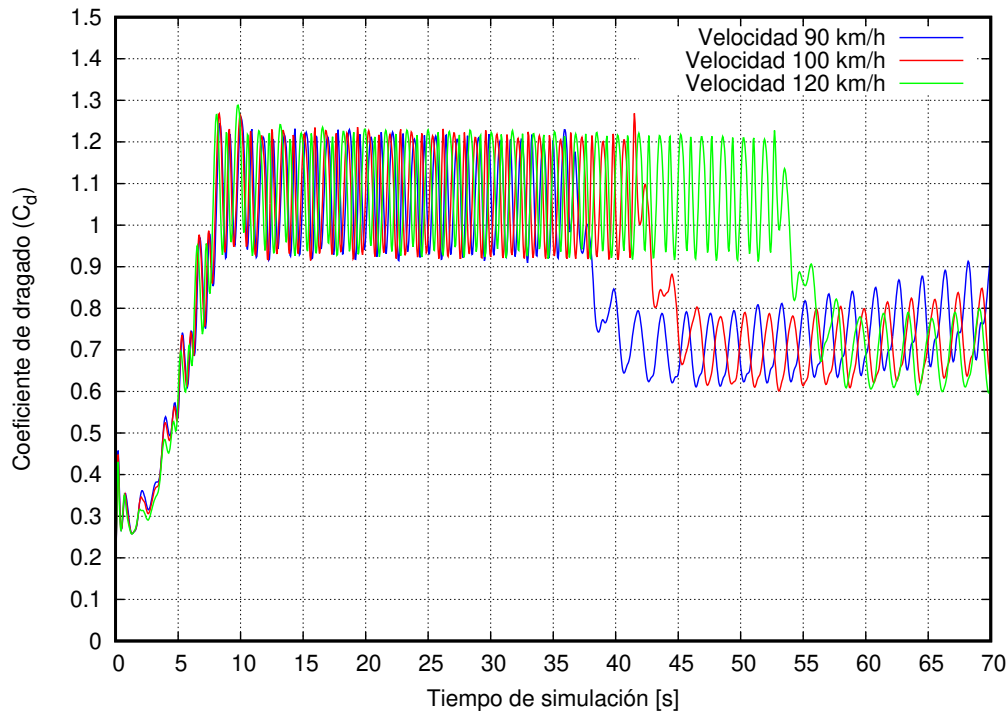


Figura 4.31: Coeficiente de dragado (C_d) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.33: Comparación de coeficiente de dragado (C_d) para el M1 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{C_d}$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h^{-1}	0,8852	00,00 %	$\sigma = 0,176$
100 km h^{-1}	0,9013	1,82 %	$\sigma = 0,193$
120 km h^{-1}	0,9627	8,76 %	$\sigma = 0,200$

Fuente: Los Autores

El coeficiente de dragado con el modelo de turbulencia aplicado para el análisis numérico permitió bajar su valor, haciendo que oscile el C_d , sin embargo, su oscilación está dentro del rango de 0,90 a 1,20 desde los 10 [s] aproximadamente hasta los 37 [s] para el análisis a 90 km h^{-1} , luego de ello el valor cae y empieza a oscilar a partir de 0,60 y empieza a subir con el tiempo hasta el final de la simulación.

El mismo caso sucede con las velocidades de 100 y 120 km h^{-1} , donde en la curva presenta un desplazamiento del efecto cuando baja el C_d pasando a 43 [s] y 54 [s] respectivamente, y de igual manera empieza a incrementarse con el pasar del tiempo.

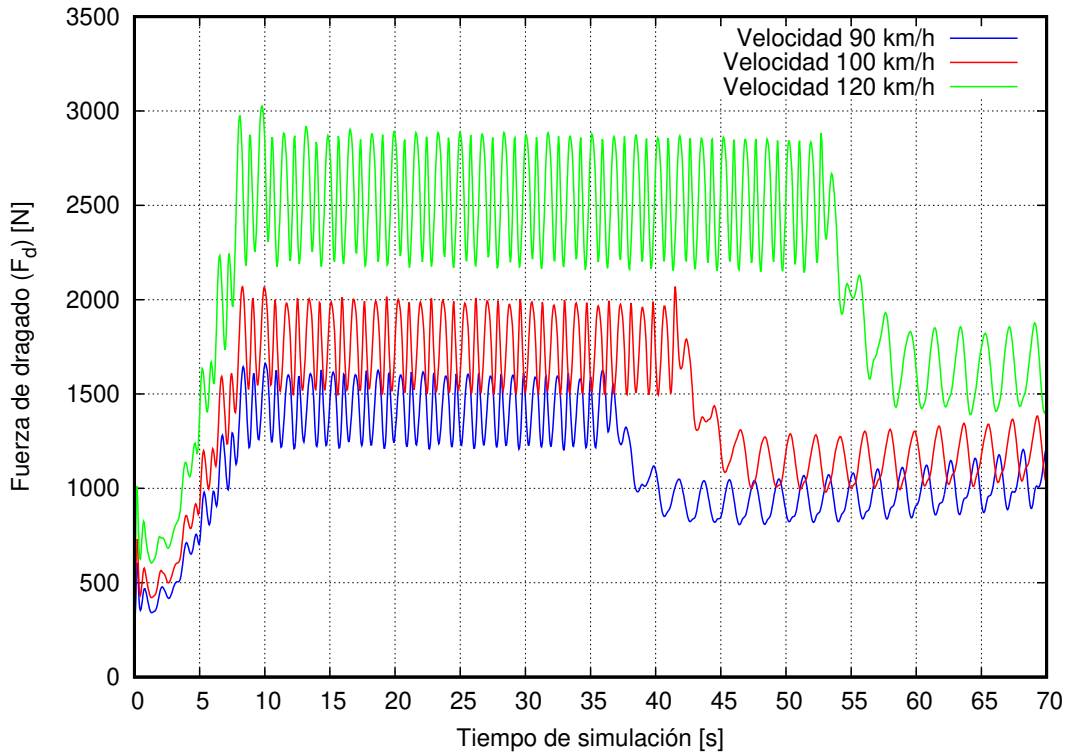


Figura 4.32: Fuerza de dragado (F_d) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.34: Comparación de fuerza de dragado (C_d) para el M1 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{F_d} [N]$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h^{-1}	1169,57	00,00 %	$\sigma = 232,61 [N]$
100 km h^{-1}	1470,21	25,71 %	$\sigma = 315,06 [N]$
120 km h^{-1}	2261,44	93,36 %	$\sigma = 469,34 [N]$

Fuente: Los Autores

Para la fuerza de dragado ocurre algo similar al coeficiente de dragado en cuanto a incrementarse durante un lapso, sin embargo, llega a un tiempo donde la fuerza desciende y empieza a fluctuar.

La fuerza a 100 km h^{-1} se incrementa en un 25 % con respecto a la fuerza que se crea cuando el autobús se mueve con una velocidad de 90 km h^{-1} , mientras, para los 120 km h^{-1} este valor se incrementa hasta 94 % aproximadamente. El promedio de dicha fuerza de dragado tiene un efecto sobre el autobús y más adelante se determinará su influencia en la eficiencia de un autobús respecto al consumo de combustible y su estabilidad.

A continuación, tanto el coeficiente de sustentación como la fuerza de sustentación tienen un valor promedio de cero, entendiendo así que, la carrocería a lo largo de la carretera tiene una oscilación hacia arriba cuando es positivo el valor y hacia abajo cuando es negativo, como muestran las figuras 4.33 y 4.34, las oscilaciones se hacen más grandes cuando se incrementa a velocidad del fluido manteniéndose para cada velocidad y cuando la velocidad es 120 km h^{-1} , este valor sobrepasa a los demás.

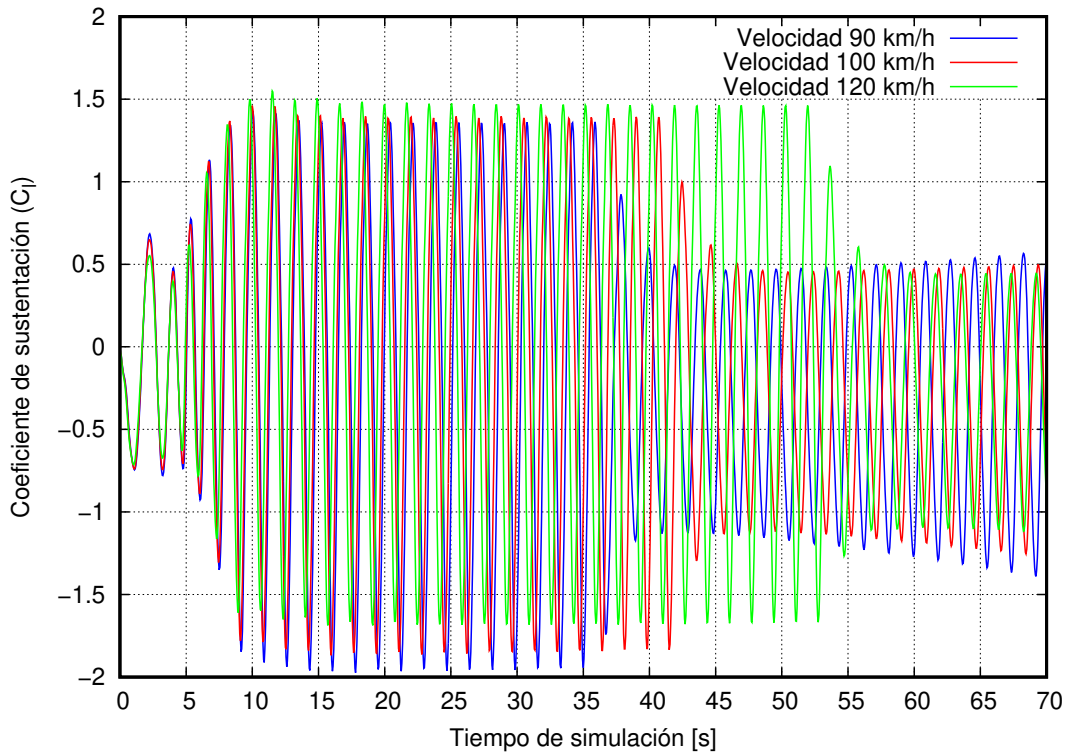


Figura 4.33: Coeficiente de sustentación (C_l) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

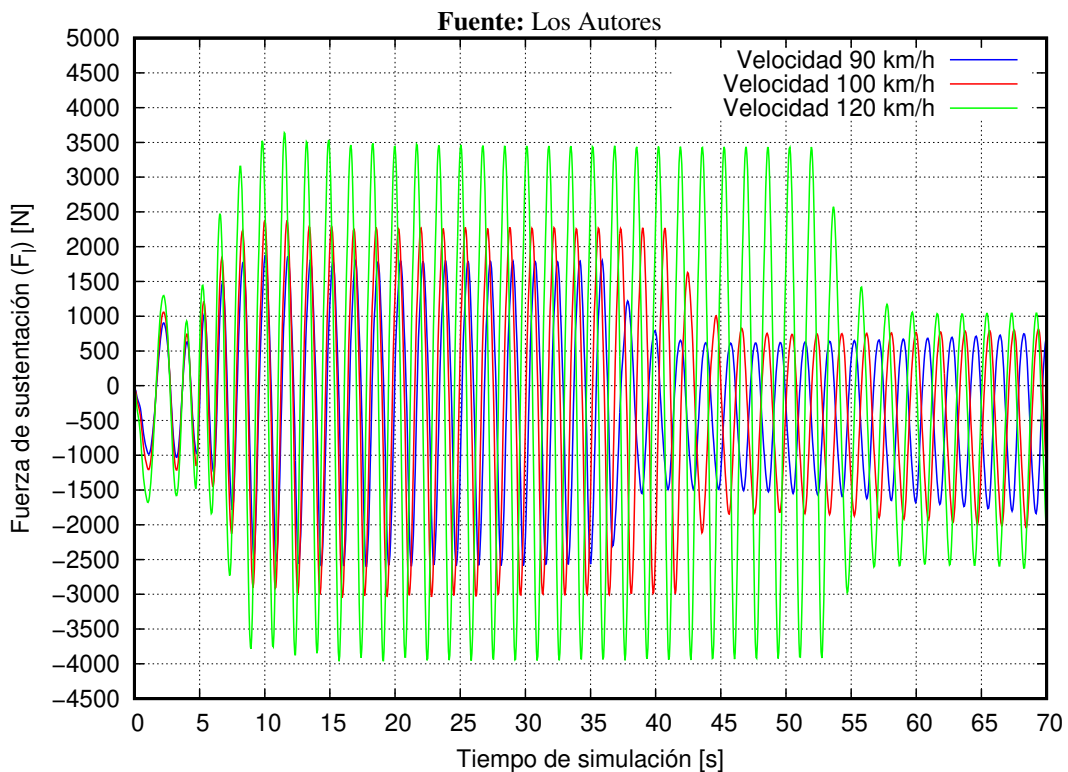


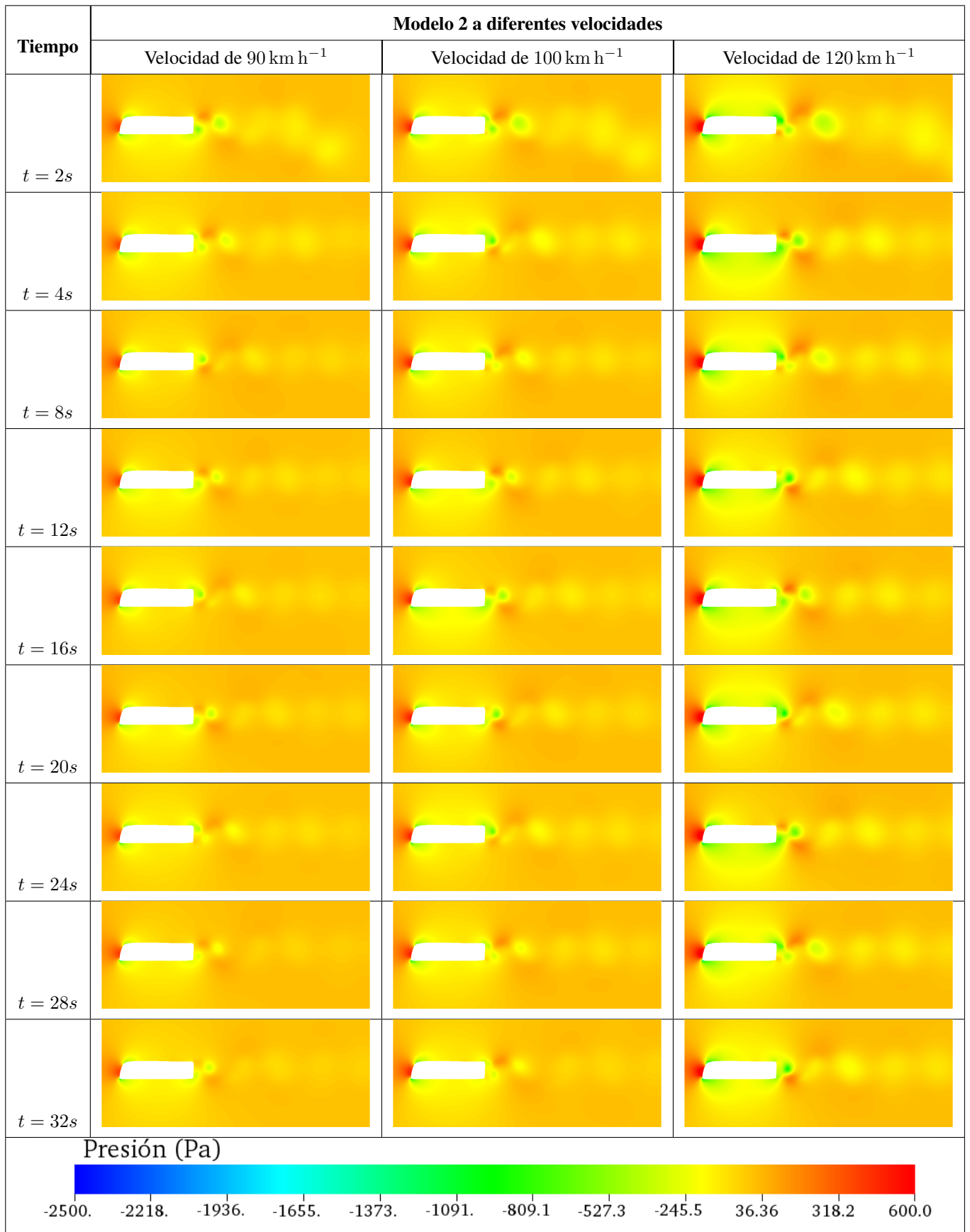
Figura 4.34: Fuerza de sustentación (F_l) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

4.5.2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2.

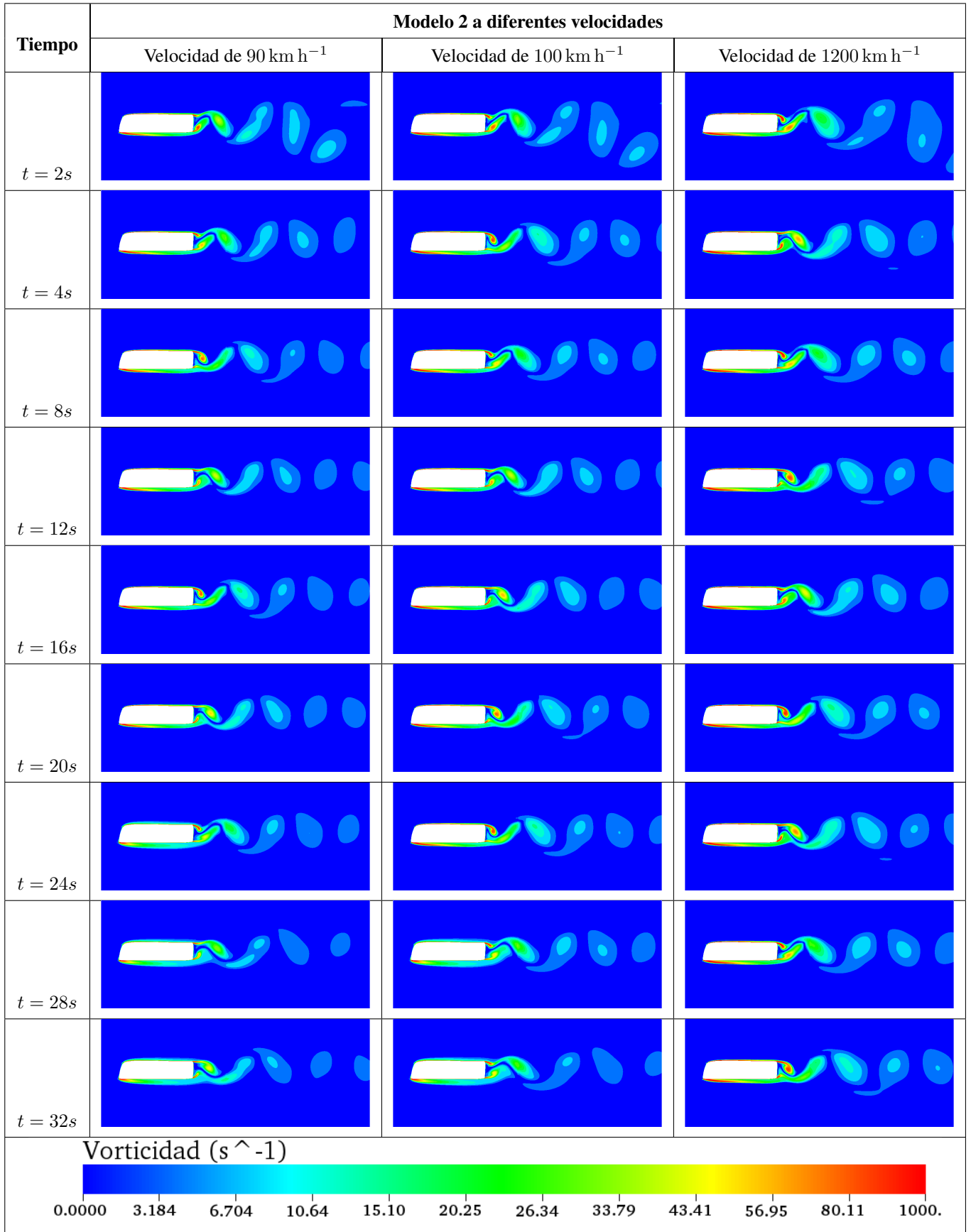
A continuación, las tablas siguientes muestran el comportamiento general alrededor de la geometría del modelo 2, para las variables de presión y vorticidad.

Tabla 4.35: Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.



Fuente: Los Autores

Tabla 4.36: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modelo de turbulencia.



Fuente: Los Autores

De la misma manera el análisis de los resultados es realizado para el M2, para tener una interpretación del comportamiento del modelo a las diferentes velocidades con la consideración del modelo de turbulencia. A continuación, se presenta la figura 4.35, y la tabla de resultados para el valor de C_d a las diferentes velocidades del análisis.

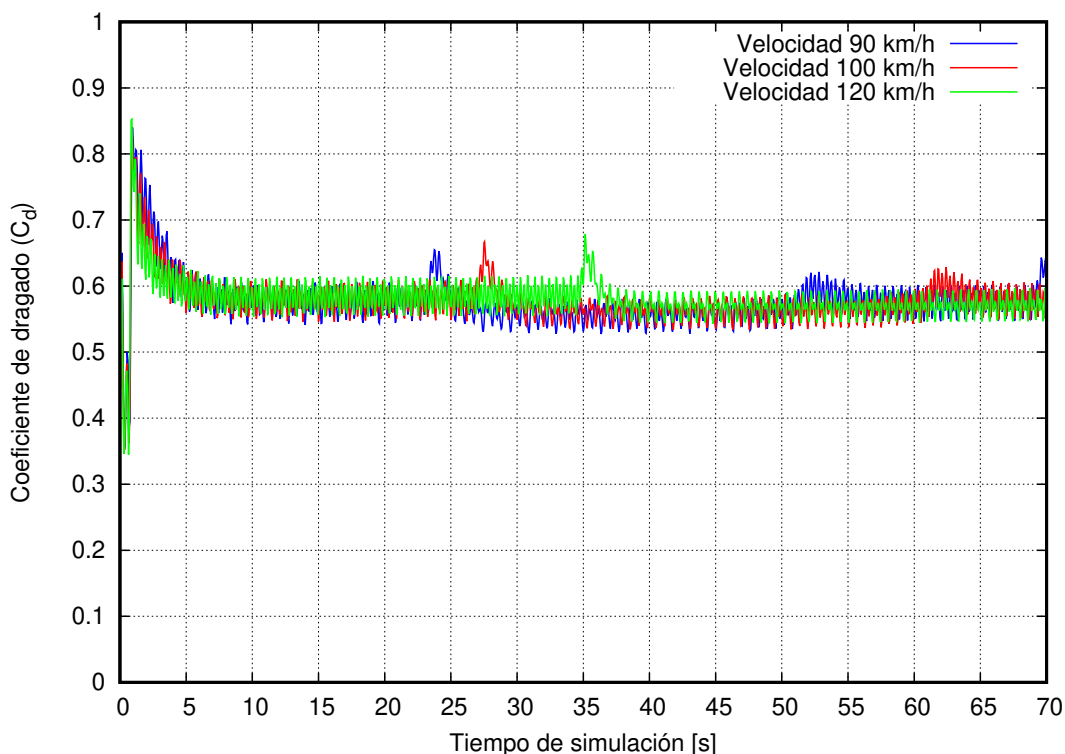


Figura 4.35: Coeficiente de dragado (C_d) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h⁻¹, (rojo) Velocidad 100 km h⁻¹ y (verde) Velocidad de 120 km h⁻¹.

Fuente: Los Autores

Tabla 4.37: Comparación de coeficiente de dragado (C_d) para el M2 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{C_d}$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h ⁻¹	0,5712	00,00 %	$\sigma = 0,0207$
100 km h ⁻¹	0,5733	0,37 %	$\sigma = 0,0194$
120 km h ⁻¹	0,5771	1,03 %	$\sigma = 0,0188$

Fuente: Los Autores

Con los resultados obtenidos para el M2 en el análisis numérico y añadido un tipo de modelo de turbulencia, no ha tenido variaciones u oscilaciones como el análisis realizado sin modelos de turbulencia (figura 4.29), esta disminución de oscilaciones en los valores del C_d esta reflejada en la figura 4.37 esto se debe a que el análisis corresponde al modelo 2, para las velocidades de 90, 100 y 120 km h⁻¹ con los colores azul, rojo y verde respectivamente.

De la misma forma el análisis matemático de los resultados dan una idea de cuanto varían entre un análisis numérico sin considerar modelos de turbulencia ($C_{d\ 90kmh^{-1}} = 0,81$) y otro con modelo de turbulencia, así el incremento del C_d tomando la referencia el obtenido a la velocidad de 90 km h⁻¹ de 0,5712, para la velocidad de 100 km h⁻¹ el valor es $C_d = 0,5733$ representando un incremento de 0,37 % considerándose como despreciable, mientras para 120 km h⁻¹ el valor es $C_d = 0,5771$ incrementándose en 1,03 %. Estos valores relativamente bajos se debe a la óptima forma que posee la carrocería y numéricamente se da conocer.

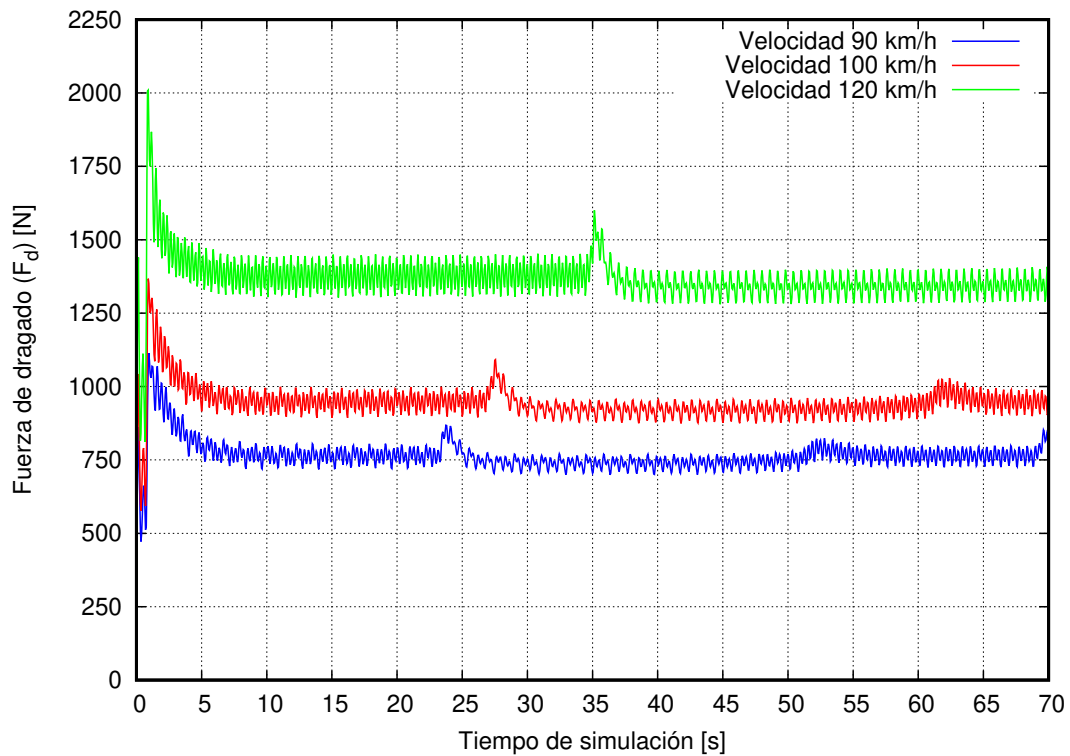


Figura 4.36: Fuerza de dragado (F_d) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.38: Comparación de Fuerza de dragado (F_d) para el M2 a diferentes velocidades.

Velocidad	$\overline{F_d} [N]$	Incremento porcentual	Desviación estándar
90 km h^{-1}	757,38	00,00 %	$\sigma = 27,44 [N]$
100 km h^{-1}	938,54	23,92 %	$\sigma = 31,73 [N]$
120 km h^{-1}	1360,02	79,57 %	$\sigma = 44,20 [N]$

Fuente: Los Autores

A continuación, en las figuras 4.37 y 4.38, se expresa el comportamiento del coeficiente y fuerza aerodinámica de sustentación respectivamente, donde el valor del C_1 promedio es $-0,59$ por debajo de cero, con una dispersión de resultados de $\sigma = 0,515$. Esto significa que el modelo 2 está sujeto a una fuerza hacia abajo en su trayectoria, lo que permite mantenerlo sobre el piso sin que éste genere una fuerza contraria que pueda generar inestabilidad al estar en movimiento. Esto se lo puede corroborar con la fuerza negativa que se genera por debajo de la geometría y aumentando conforme se incrementa la velocidad de movimiento, así para 90 km h^{-1} , 100 km h^{-1} y 120 km h^{-1} se tiene un valor de $-799,60 \text{ N}$ ($\sigma = 685,18$), $-931,33 \text{ N}$ ($\sigma = 861,40$) y $-1370,10 \text{ N}$ ($\sigma = 1191,55$) respectivamente.

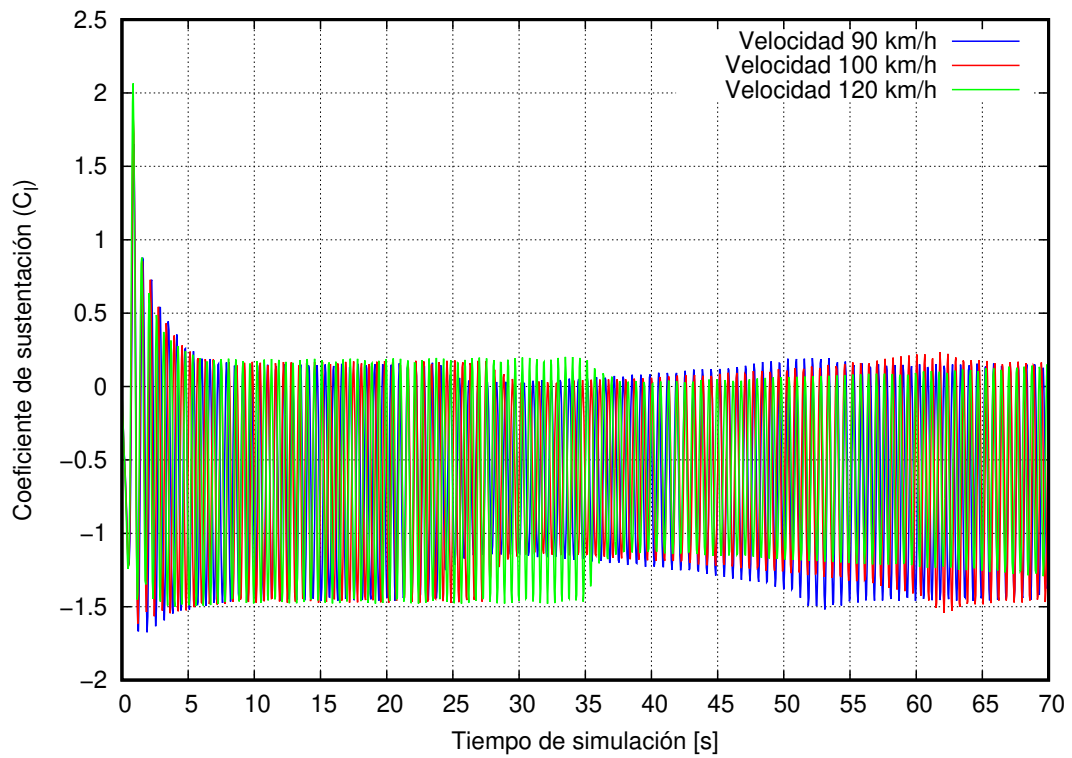


Figura 4.37: Coeficiente de sustentación (C_l) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h⁻¹, (rojo) Velocidad 100 km h⁻¹ y (verde) Velocidad de 120 km h⁻¹.

Fuente: Los Autores

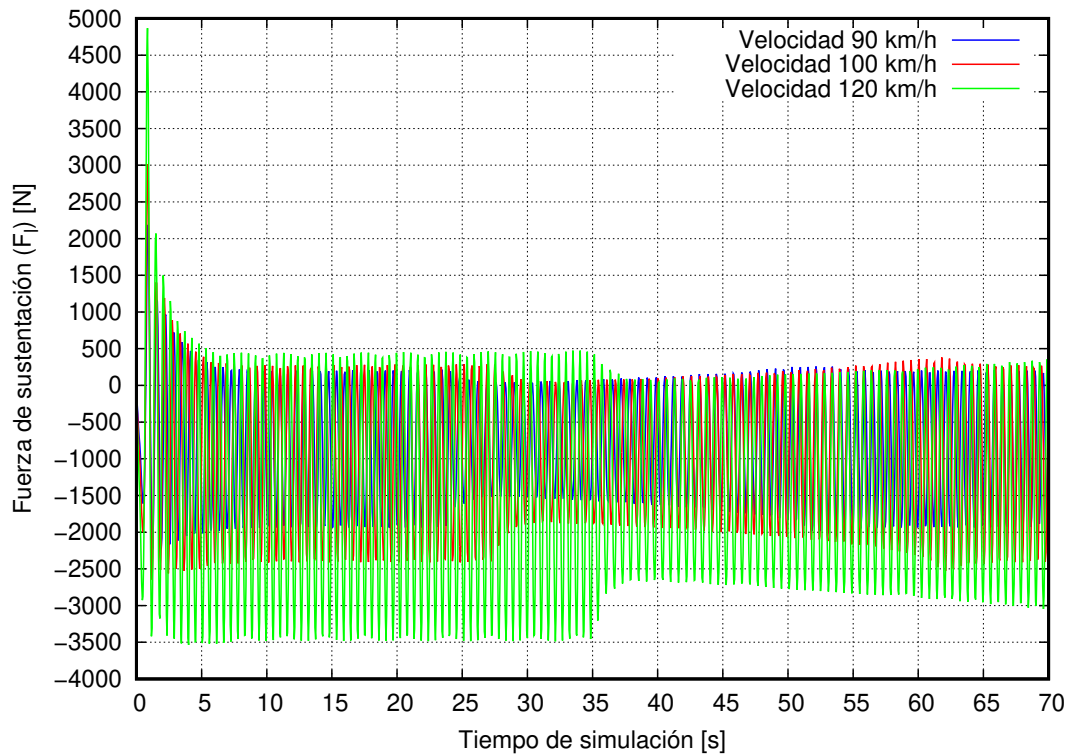


Figura 4.38: Fuerza de sustentación (F_l) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h⁻¹, (rojo) Velocidad 100 km h⁻¹ y (verde) Velocidad de 120 km h⁻¹.

Fuente: Los Autores

4.5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS FUERZAS AERODINÁMICAS ENTRE LOS MODELOS 1 Y 2

A continuación, la tabla 4.39, compara los resultados entre los dos modelos de estudio M1 y M2, las variables del coeficiente y fuerza de dragado, mientras en la tabla 4.40, el coeficiente y fuerza de sustentación que generaron los dos modelos a diferentes velocidades.

Tabla 4.39: Comparación de C_d y F_d entre M1 y M2 a diferentes velocidades.

Variables	Resultados de comparación			
	Velocidad	Modelo 1	Modelo 2	Diferencia porcentual
Coeficiente de dragado	90 km h ⁻¹	0.8852	0.5712	35.47 %
	100 km h ⁻¹	0.9013	0.5733	36.39 %
	120 km h ⁻¹	0.9627	0.5771	40.05 %
Fuerza de dragado	90 km h ⁻¹	1169.57 [N]	757.38 [N]	35.24 %
	100 km h ⁻¹	1470.21 [N]	938.54 [N]	36.16 %
	120, km h ⁻¹	2261.44 [N]	1360.02 [N]	39.86 %

Fuente: Los Autores

En la tabla 4.39, muestra los diferentes resultados obtenidos para el coeficiente y fuerza de dragado a las diferentes velocidades de análisis, donde la diferencia encontrada entre el modelo 1 y 2 de estudio es expresada en forma porcentual para entender como varía el resultado entre los dos modelos. Es así, para la velocidad de 90 km h⁻¹ el M1 tiene un C_d un 35,50 % más grande que el M2 haciendo menos eficiente pues necesita una mayor fuerza para vencer la resistencia aerodinámica que tiene el aire. Para las velocidades de 100 y 120 km h⁻¹, este valor se incrementa pasando a ser 36,40 % y 40 % respectivamente más grande para el M1 comparado al M2. Con lo expresado, la fuerza de dragado presenta la misma diferencia porcentual que el coeficiente de dragado, con ello muestra como el M1 debe realizar una mayor fuerza para vencer la resistencia que genera el aire al estar en movimiento.

Tabla 4.40: Comparación de C_l y F_l entre M1 y M2 a diferentes velocidades.

Variables	Resultados de comparación				
	Velocidad	Modelo 1	Desviación estándar	Modelo 2	Desviación estándar
Coeficiente de sustentación	90 km h ⁻¹	-0.2575	0.828	-0.603	0.517
	100 km h ⁻¹	-0.2063	0.851	-0.599	0.506
	120 km h ⁻¹	-0.0926	0.920	-0.581	0.526
Fuerza de sustentación	90 km h ⁻¹	-340.28 [N]	1094.14 [N]	-799.60 [N]	685.18 [N]
	100 km h ⁻¹	-336.54 [N]	1388.55 [N]	-981.33 [N]	861.40 [N]
	120 km h ⁻¹	-217.55 [N]	2161.20 [N]	-1370.10 [N]	1191.55 [N]

Fuente: Los Autores

El coeficiente y fuerza de sustentación son otros parámetros importantes en la aerodinámica, para entender el comportamiento de los diferentes modelos M1 y M2 a lo largo del tiempo de simulación y bajo ciertas condiciones.

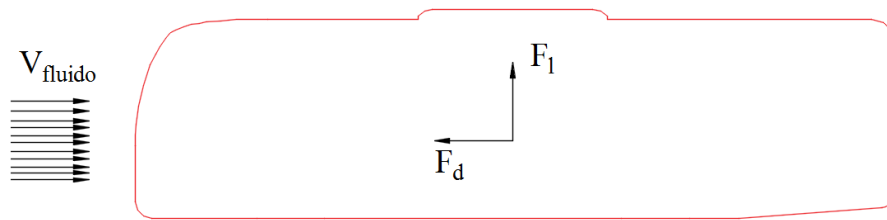


Figura 4.39: Interpretación de fuerzas aerodinámicas.

Fuente: Los Autores

Como se observa en la figura 4.39, la fuerza de arrastre (F_d) es una reacción que se produce en forma opuesta a la dirección de flujo, siendo de esta manera la resistencia que debe vencer para poder avanzar, mientras que la fuerza de sustentación (F_l) se produce de manera perpendicular a las líneas de flujo haciendo que los objetos empiecen a elevarse, éste es el principio que utilizan los aviones para poder elevarse, para este caso dicha fuerza nos permite tener mayor estabilidad al moverse.

La tabla 4.40, muestra el coeficiente de sustentación para ambos modelos a diferentes velocidades y su desviación estándar que tienen los resultados conforme al valor medio expresado, de cierta manera la dispersión que tienen los datos de resultados para los dos modelos es 0,80.

Además, el C_l es negativo, pues la fuerza de sustentación es negativa y Fluent calcula primero F_l y luego el C_l , explicación para que esto ocurra es que las presiones existentes en la parte superior del perfil de autobús sea mayor a la presión en la parte inferior del bus, creando una fuerza que presiona al autobús permitiendo mantenerse pegado al piso a lo largo de su trayectoria esto se denomina gradiente de presión, es decir, F_l tiene dirección hacia abajo.

Con los datos obtenidos, se observa que el modelo 2, en cuanto a eficiencia es mejor pues mantiene un C_d 35 % más bajo que el modelo 1, y en cuanto a estabilidad, también presenta mayor fuerza de sustentación hacia abajo para mantenerlo pegado al piso. Con esto se buscará realizar varias modificaciones al modelo 1 para hacerlo más eficiente.

PARTE II: PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA AERODINÁMICA DE CARROCERÍAS DE LOS AUTOBUSES

4.6. PLANTEAMIENTO DE GEOMETRÍAS MODIFICADAS DE LOS AUTOBUSES.

Las propuestas que se muestran a continuación en las figuras 4.41 y 4.42 son realizadas con algunas modificaciones en los modelos en la parte externa, debido a que existe una necesidad de encontrar nuevas formas o la implementación de dispositivos para reducir la resistencia aerodinámica en autobuses.

Desde el punto de vista ingenieril la curva frontal debe estar localizada de forma que permita una buena visibilidad del conductor, en base a la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1668 para vehículos de transporte público de pasajeros interprovincial, señala que la zona de visibilidad frontal superior: debe permitir identificar un objeto ubicado a 15 [m] por delante del autobús y a 4,5 [m] de alto desde el nivel de la calzada y en la zona de visibilidad frontal inferior: debe identificar un objeto ubicado a 0,8 [m] por delante del bus y a 1.4 [m] de la calzada.

Por otro lado la curvatura no debe exceder los 60° respecto a la vertical ya que aparecen problemas, tales como el calentamiento excesivo del habitáculo, problemas de visibilidad debido a los rayos del sol para el chófer.

Otro de los problemas existentes es si sobrepasa el límite del ángulo no habría espacio suficiente para ubicar la puerta de ingreso de los pasajeros pues según la norma el espacio disponible para aquello es el 66 % de la distancia entre ejes, que resulta estar en el rango de 2000 a 2900 [mm] y con una altura mínima desde el estribo de 2000 [mm].

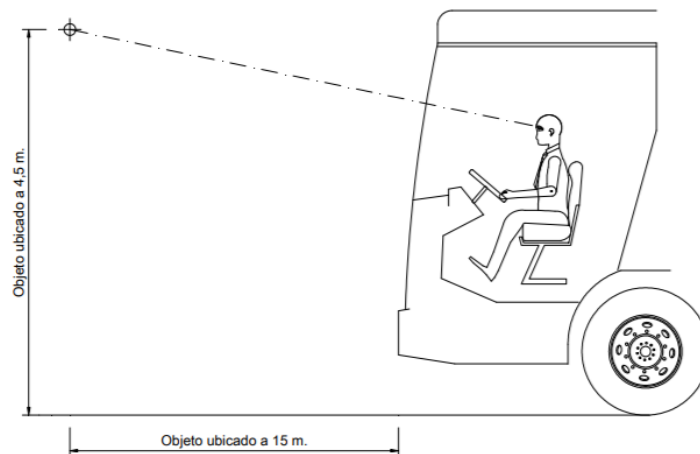


Figura 4.40: Visibilidad frontal superior del conductor

Fuente: NTE INEN 1668

Las modificaciones realizadas a los modelos originales pretenden dar un mejor diseño geométrico y aerodinámico; y para ello se han realizado simulaciones con la finalidad de poder evaluar cómo cambian los coeficiente de dragado y de sustentación con las modificaciones realizadas.

A continuación, se explica las modificaciones a los perfiles.

4.6.1. MODIFICACIONES PLANTEADAS PARA EL MODELO 1

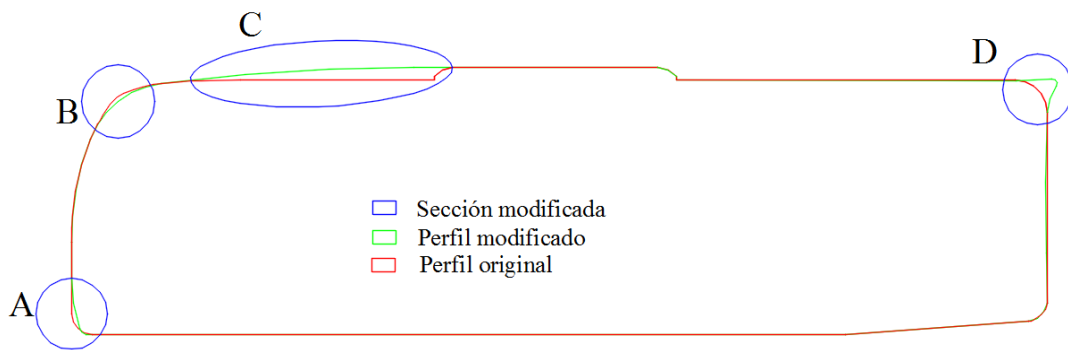


Figura 4.41: Perfil M2 con las modificaciones en los puntos A, B, C y D.

Fuente: Los Autores

Sección A: En esta sección se trabajó más en el ángulo de aproximación cambiando este de 12° a 13° , mediante el redondeo de la carrocería en la parte inferior frontal, con ello se espera distribuir de mejor forma las líneas del flujo de aire alrededor de la capa del autobús.

Sección B: En la parte superior frontal del perfil de autobús, la modificación realizada es la disminución del ángulo que se forma entre: la tangente a la curva del parabrisas y el eje vertical positivo, cambiando de $42,50^\circ$ a $45,00^\circ$, esto para poder mantener el cambio de sección entre B y C.

Sección C: En esta parte el objetivo es aumentar la sección de deslizamiento del flujo de aire, uniendo la parte frontal del bus con la parte donde habitualmente se ubica el equipo de aire acondicionado, pues esto nos permite que el flujo se deslice alrededor del autobús, evitando tener secciones con aristas vivas en la parte frontal donde impacta el flujo.

Sección D: La idea del uso de un alerón en la parte superior posterior del autobús. Al incluir eso no es más que una ala de avión invertida, pues en un avión lo que hace es disminuir la velocidad del aire creando una fuerza vertical para que se eleve, sin embargo, en nuestros modelos se busca invertir ese fenómeno con lo cual el alerón nos ayudará a mantener el autobús sobre el suelo constantemente, con esto se busca tener una mayor estabilidad y un óptimo control a velocidades moderadas.

Con las modificaciones realizadas al modelo se pretende reducir el coeficiente de dragado que se genera en el modelo original y la fuerza de dragado que se crea.

4.6.2. MODIFICACIONES PARA EL MODELO 2

En la figura 4.41 se observa un perfil sobre el otro, para poder distinguir las variaciones de la modificación, el perfil de color rojo es el modelo real, y el perfil con el color azul es el modelo modificado.

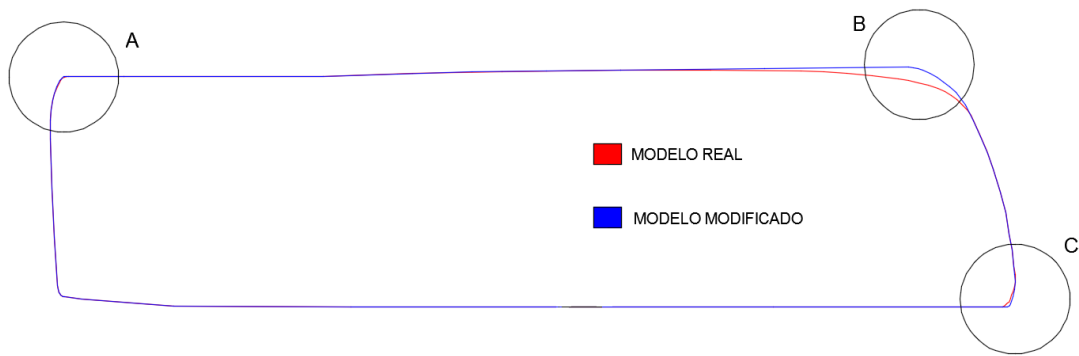


Figura 4.42: Perfil M2 con las modificaciones en los puntos A, B y C

Fuente: Los Autores

En la sección A: está modificación se realizó en base a la utilización de un alerón en la parte posterior del autobús.

En la sección B: se ha disminuido el ángulo de la curvatura frontal respecto al eje x positivo, generando una leve joroba en el prototipo modificado con un ángulo de 126° a 100° .

En la sección C: se ha incrementado la curvatura del perfil en la base inferior con el motivo de incrementar el área frontal de contacto al ingreso del aire, mediante la instalación de un spoiler en la parte inferior delantera del autobús para reducir la resistencia aerodinámica, y reducir la fuerza de sustentación positiva en el eje delantero.

Con el planteamiento de las alternativas se analizan los resultados de los dos modelos M1 y M2.

4.6.3. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 CON MODIFICACIONES

En la tabla 4.41, se muestra para el modelo 1 la presión a las distintas velocidades de estudio en sus respectivos tiempos y claramente se observa que mientras va aumentando la velocidad, la presión va aumentando simultáneamente.

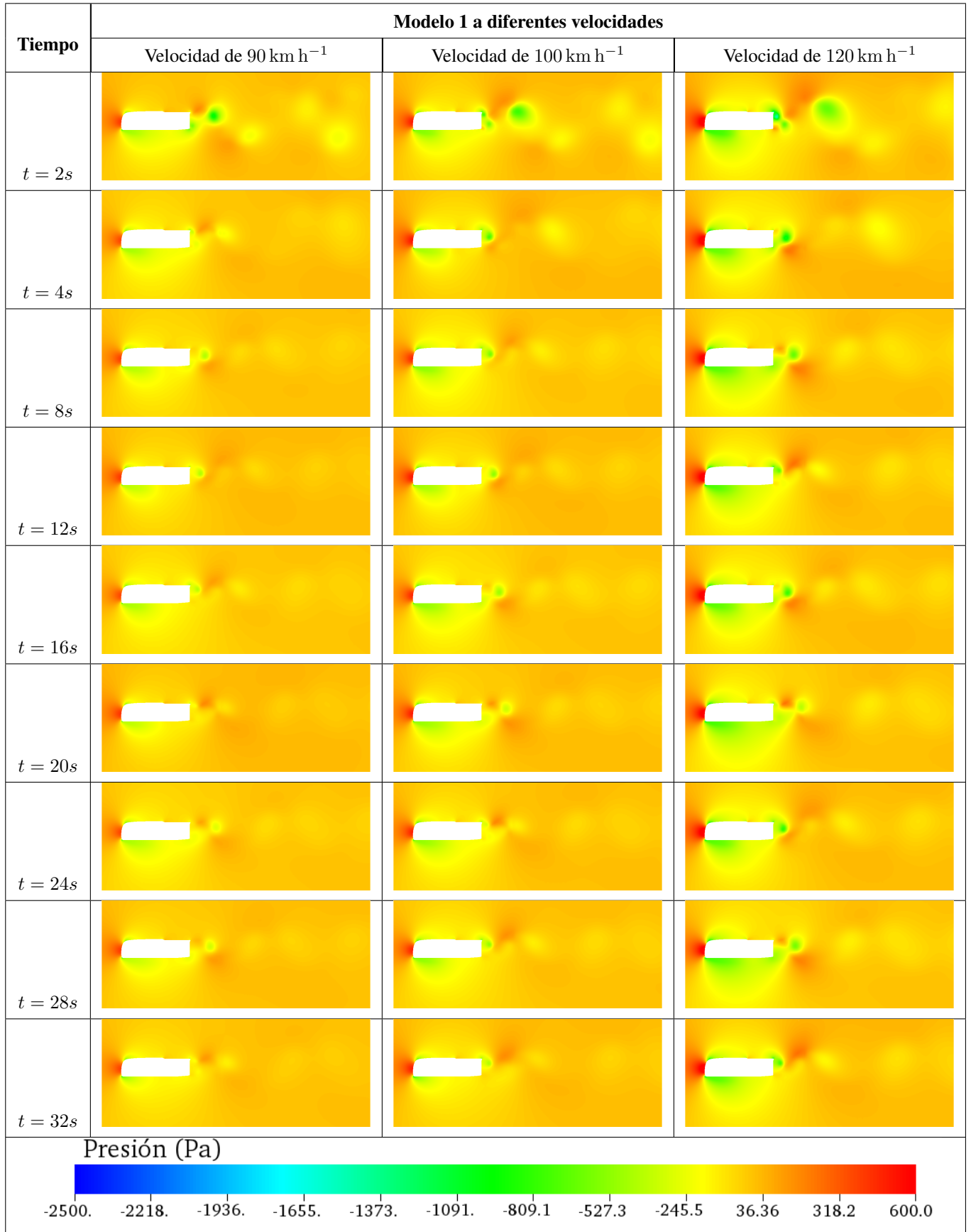
Del mismo modo la presión se mantiene elevada en la parte frontal del autobús, este valor se incrementa al pasar el tiempo y al aumentar la velocidad.

Realizando una comparación entre la tabla 4.41 y la tabla 4.23, en la tabla de presión para el modelo modificado se observa una presión mayor que en los modelos originales, debido a que no existe en la escala de colores los valores correspondientes de -2500 Pa a -1373 Pa. Así también se observa que a medida que la velocidad aumenta la presión disminuye paulatinamente en el modelo analizado.

En la tabla 4.42, se muestra la vorticidad del modelo 1 a las diferentes velocidades con su modificación, donde se observa que el flujo de aire es más uniforme, es decir se acopla a la forma del bus, haciendo que se generen menos vórtices en la parte posterior del autobús.

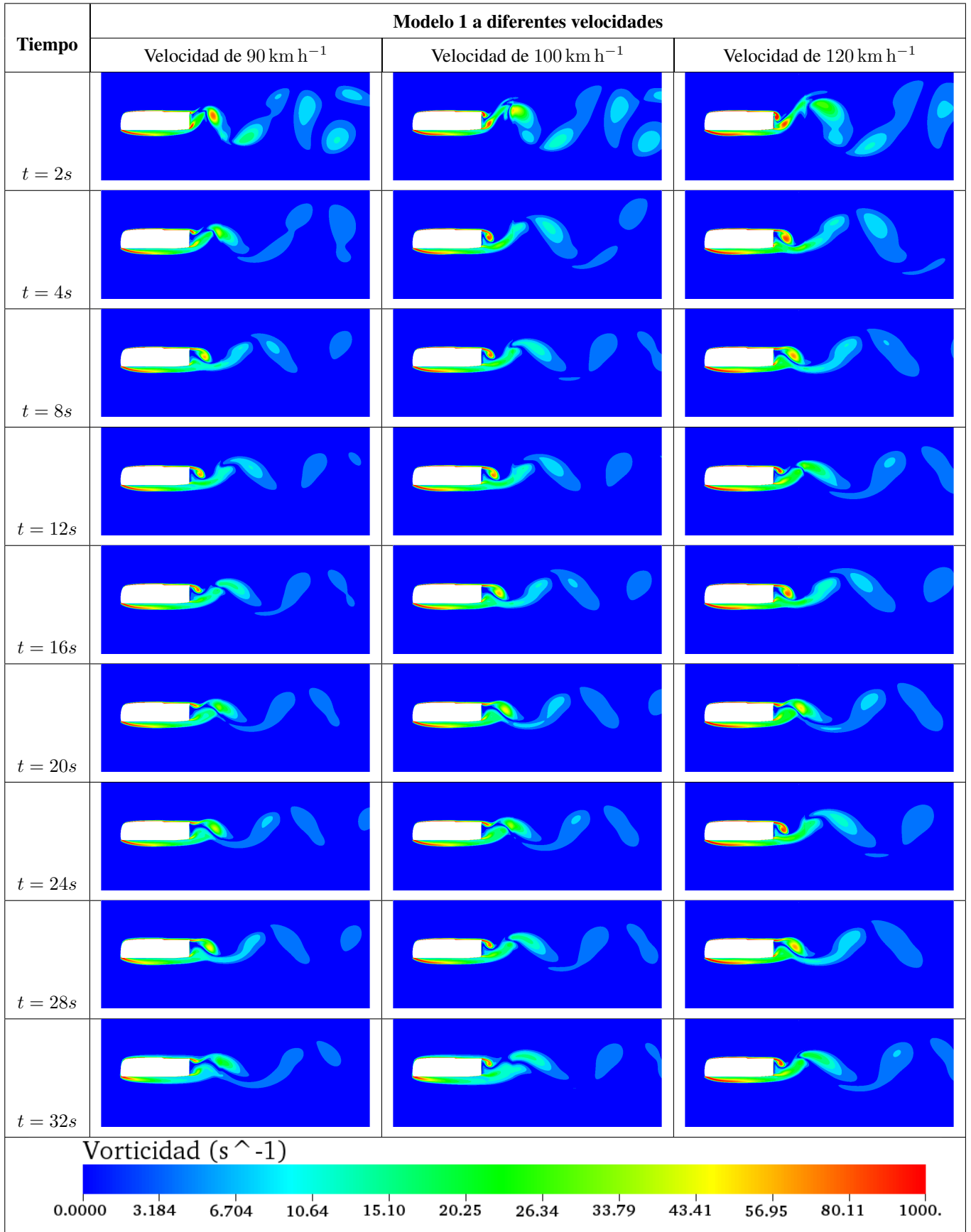
Sin embargo, para un mismo tiempo pero a diferentes velocidades el modelo 1, en la vorticidad existe un incremento en la intensidad de los vórtices, lo que se podría manifestar que la vorticidad está en función de la velocidad, es decir a mayor velocidad mayor formación de vórtices.

Tabla 4.41: Presión a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modificaciones.



Fuente: Los Autores

Tabla 4.42: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo 1 a diferentes velocidades con modificaciones.



Fuente: Los Autores

Las figuras 4.43 y 4.44, muestran el comportamiento del coeficiente dragado y fuerza de dragado respectivamente, donde las curvas están expresadas de acuerdo a la velocidad del fluido para todo el tiempo de simulación realizado.

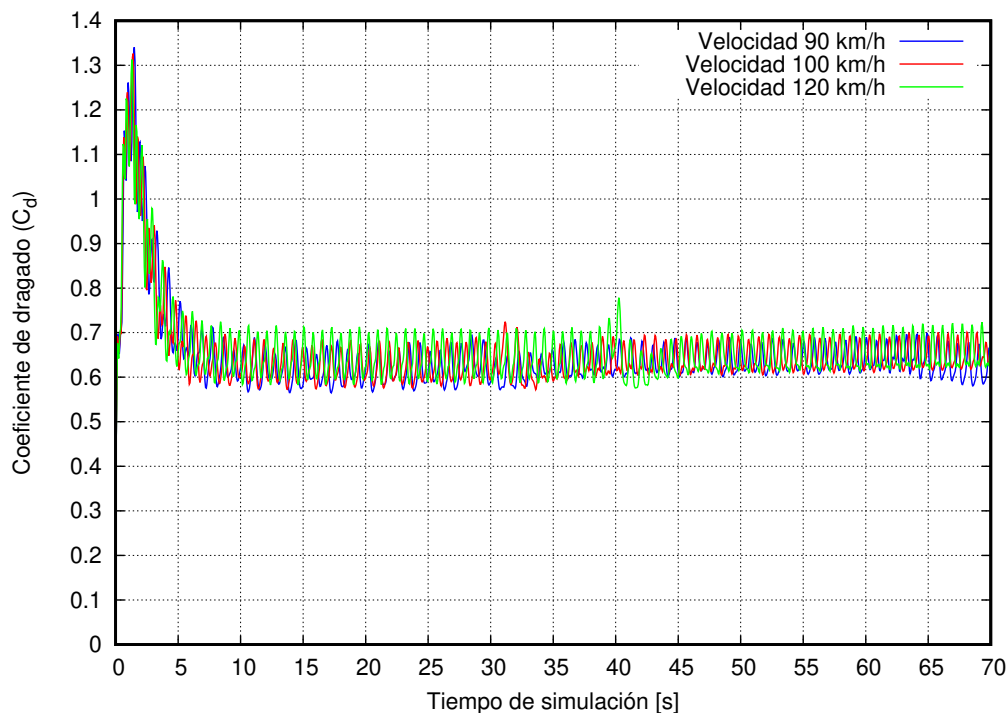


Figura 4.43: Coeficiente de dragado (C_d) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

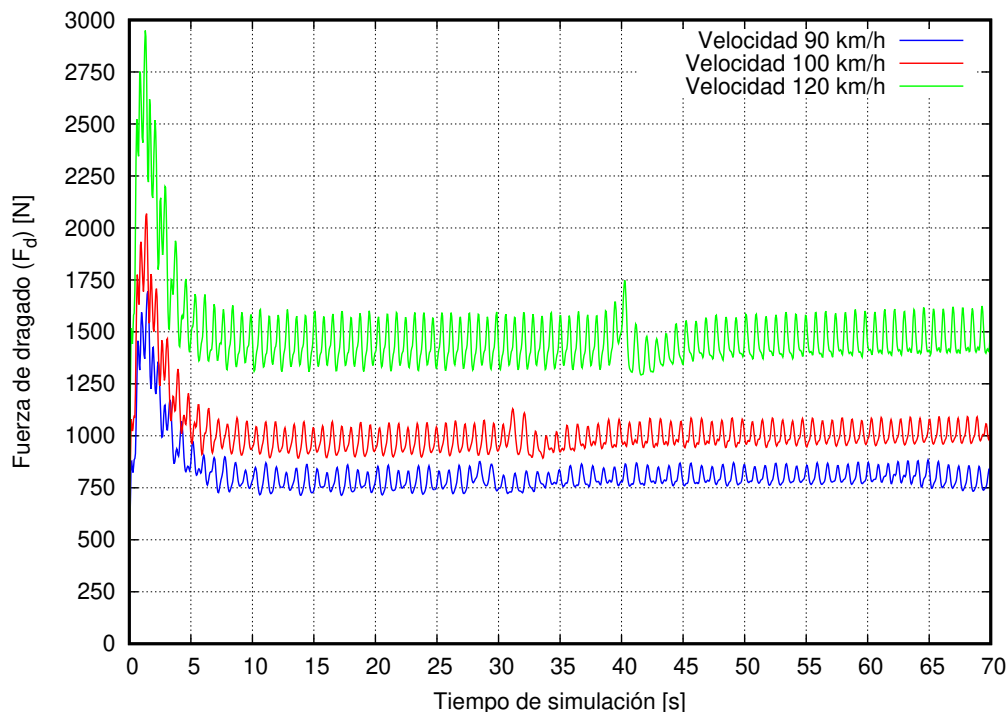


Figura 4.44: Fuerza de dragado (F_d) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

En la siguiente tabla 4.43, muestra los valores obtenidos para el coeficiente y fuerza de dragado para las diferentes velocidades donde se compara y calcula la diferencia porcentual existente entre los valores promedios.

El coeficiente de dragado por una parte se redujo de manera notoria pasando de 0,90 a 0,63 para todos los casos, donde a 90 km h^{-1} tiene una desviación estándar baja de 0,031, estos resultados no varían de mayor forma durante todo el tiempo de simulación, el valor de coeficiente de dragado a 100 km h^{-1} aumenta un 1,39 % con respecto al con una velocidad de 90 km h^{-1} , de la misma manera su dispersión de resultados es muy baja como indica la tabla 4.43, así mismo para la velocidad de 120 km h^{-1} su incremento de C_d es 3 % con una desviación de resultados de 0,037 siendo muy baja comparada con el modelo original.

La fuerza de dragado también fue afectada con las modificaciones realizadas donde además de disminuir el valor promedio para todas las velocidades se disminuyó también la dispersión de los resultados en base a la media aritmética calculada. Es así que para la velocidad de 90 km h^{-1} se tiene un valor de 791,48 [N] con una desviación de 39,15 siendo un valor muy bajo que con la conseguida con el modelo original que tiene 1169,57 [N] mientras cuando es 100 km h^{-1} se incrementa un 25,19 % con respecto a los 90 km h^{-1} y de similar manera cuando es 120 km h^{-1} este valor se incrementa un 83,11 % con una dispersión de 84.

Tabla 4.43: Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M1 modificado a diferentes velocidades.

Variables	Resultados a comparar			
	Velocidad	Modelo 1	Incremento porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de dragado	90 km h^{-1}	0,6265	0,00 %	$\sigma = 0,031$
	100 km h^{-1}	0,6352	1,39 %	$\sigma = 0,0321$
	120 km h^{-1}	0,6453	3,00 %	$\sigma = 0,0374$
Fuerza de dragado	90 km h^{-1}	791,48[N]	0,00 %	$\sigma = 39,15 [N]$
	100 km h^{-1}	990,84[N]	25,19 %	$\sigma = 50,03 [N]$
	120 km h^{-1}	1449,29[N]	83,11 %	$\sigma = 84,00 [N]$

Fuente: Los Autores

En las figuras 4.45 y 4.46, muestran el comportamiento del coeficiente y fuerza de sustentación respectivamente, para las diferentes velocidades, formando oscilaciones en las dos figuras variando estos valores dentro de un rango durante un cierto tiempo.

En la figura se muestra el comportamiento del coeficiente de sustentación, donde sus valores oscilan para todas las velocidades por debajo de cero, este valor a las 3 velocidades de estudio se mantiene por debajo del cero, sin embargo, la duración de las oscilaciones para los 90 km h^{-1} se encuentra a partir de lo 10 [s] hasta lo 27 [s], después de ello su valor se incrementa y empieza a oscilar y descende. De la misma manera sucede con la velocidad de 100 km h^{-1} estando dentro de 10 [s] hasta 30 [s], luego se incrementa y vuelve a descender hasta estabilizarse. Sin embargo, para 120 km h^{-1} el tiempo permanece estable desde 10 [s] hasta los 40 [s], ascendiendo a partir de ese instante y descendiendo luego de ello.

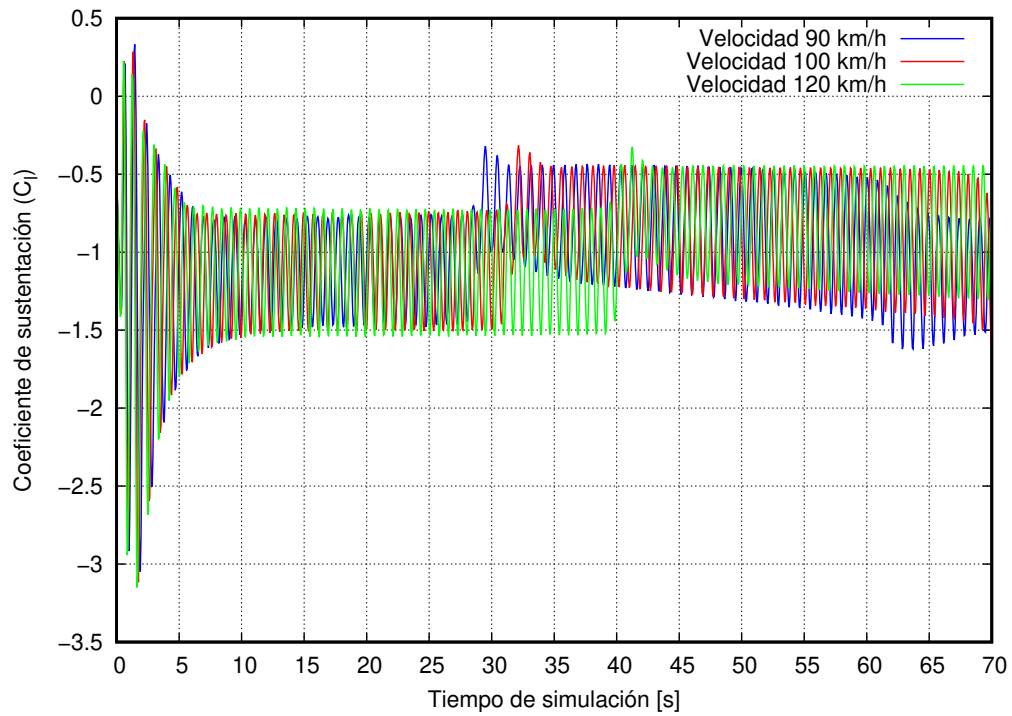


Figura 4.45: Coeficiente de sustentación (C_l) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

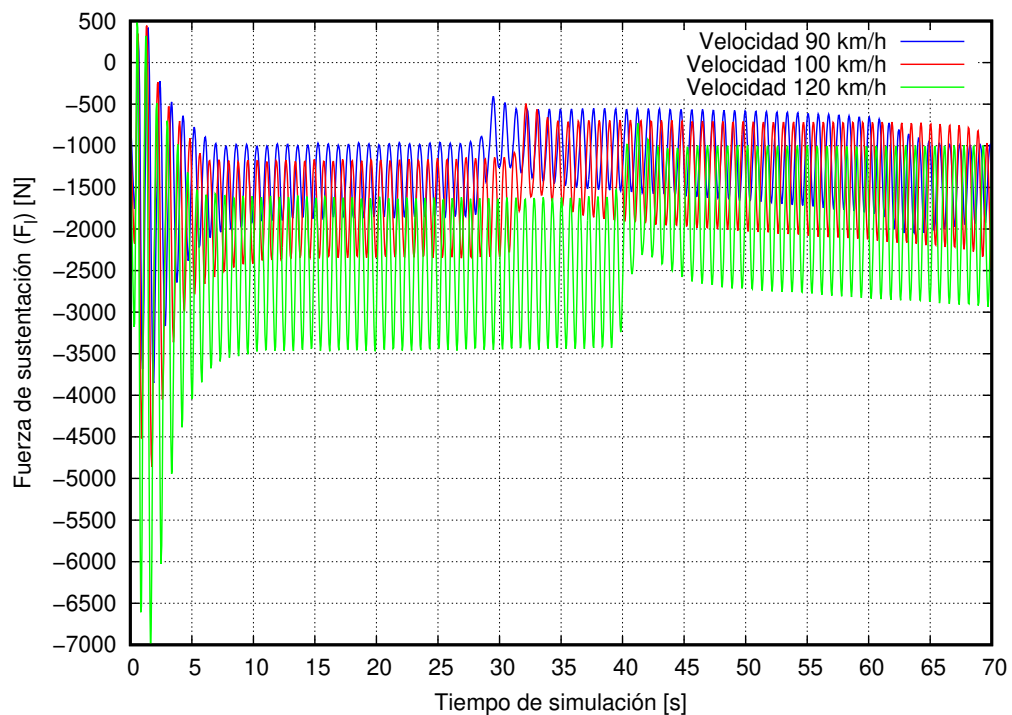


Figura 4.46: Fuerza de sustentación (F_l) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

En la figura 4.46, mostramos el comportamiento de la fuerza de sustentación que se genera de forma perpendicular al perfil de modelo de autobús, éste varía con la velocidad a la cual se analiza siendo más pequeñas a 90 km h^{-1} y crece cuando es 100 km h^{-1} y 120 km h^{-1} .

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento del coeficiente y fuerza de sustentación presentando su va-

lor promedio a diferentes velocidades y su desviación estándar para entender cuan dispersos se encuentran los resultados.

Tabla 4.44: Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M1 modificado a diferentes velocidades.

Variables	Resultados a comparar		
	Velocidad	Modelo 1	Desviación estándar
Coeficiente de sustentación	90 km h ⁻¹	-0,970	$\sigma = 0,304$
	100 km h ⁻¹	-0,961	$\sigma = 0,318$
	120 km h ⁻¹	-0,956	$\sigma = 0,320$
Fuerza de sustentación	90 km h ⁻¹	-1225,50[N]	$\sigma = 384,47 [N]$
	100 km h ⁻¹	-1499,05[N]	$\sigma = 495,65 [N]$
	120 km h ⁻¹	-2147,11[N]	$\sigma = 718,73 [N]$

Fuente: Los Autores

En la tabla 4.44, muestran datos tabulados del coeficiente y fuerza de sustentación donde el valor está por debajo de cero con una desviación estándar baja para el coeficiente de sustentación para las velocidades a las que fue sometida el modelo en estudio.

De la misma manera ocurre para la fuerza de sustentación que presenta un valor promedio negativo y al ser una fuerza perpendicular a la dirección de flujo, esta fuerza está hacia abajo o sobre la geometría del modelo y se entendería que permite mantenerse estable sobre el piso.

4.6.3.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE GEOMETRÍA ORIGINAL Y MODIFICADA DEL MODELO 1 EN ESTUDIO.

En la interpretación de los resultados es necesario comparar entre el modelo geométrico original y el modificado para detallar si las modificaciones implementadas al modelo ayudaron a mejorar su aerodinámica.

De manera cualitativa la figura 4.47, denota disminución del C_d en el modelo 1 modificado. Estos resultados se presentan de manera matemática en la tabla 4.45, donde comparan los resultados obtenidos, los valores promedios de C_d para el modelo original y modificado del modelo 1.

En la tabla 4.45, tanto el coeficiente y fuerza de dragado disminuye con el modelo modificado a diferentes velocidades, se evidencia que el decrecimiento del coeficiente para todas la velocidades fue el alrededor del 30%. Detallada de una manera más específica el C_d para una velocidad de 90 km h⁻¹ su reducción es del 29,23 %, lo que se espera reducir además el consumo de combustible del autobús, para la velocidad de 100 km h⁻¹, la reducción es del 29,52 %, mientras, para la velocidad de 120 km h⁻¹, el modelo modificado presenta una disminución considerable de 32,97 %, esta mejora permitirá al autobús reducir el consumo del combustible y alcanzando dicha velocidad sin que afecte la estabilidad del autobús.

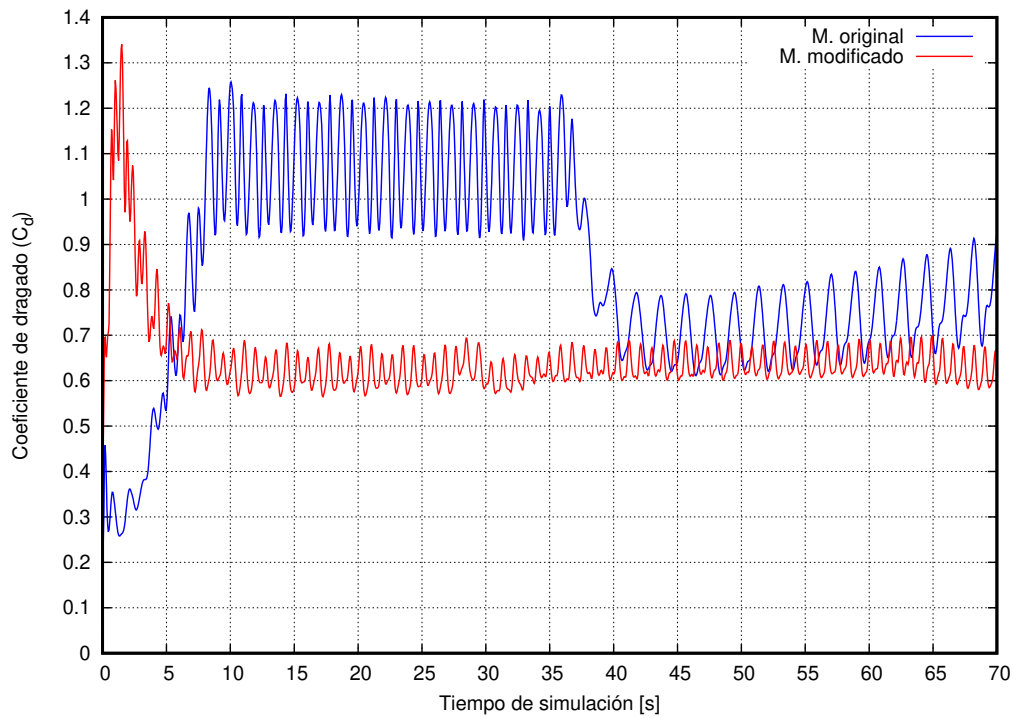


Figura 4.47: Comparación del (C_d) del modelo 1 de los modelos original y modificado a velocidad de 90 km h^{-1} .

La curva roja correspondiente al modelo 1 modificado disminuye su valor en $\sim 30 \%$.

Fuente: Los Autores

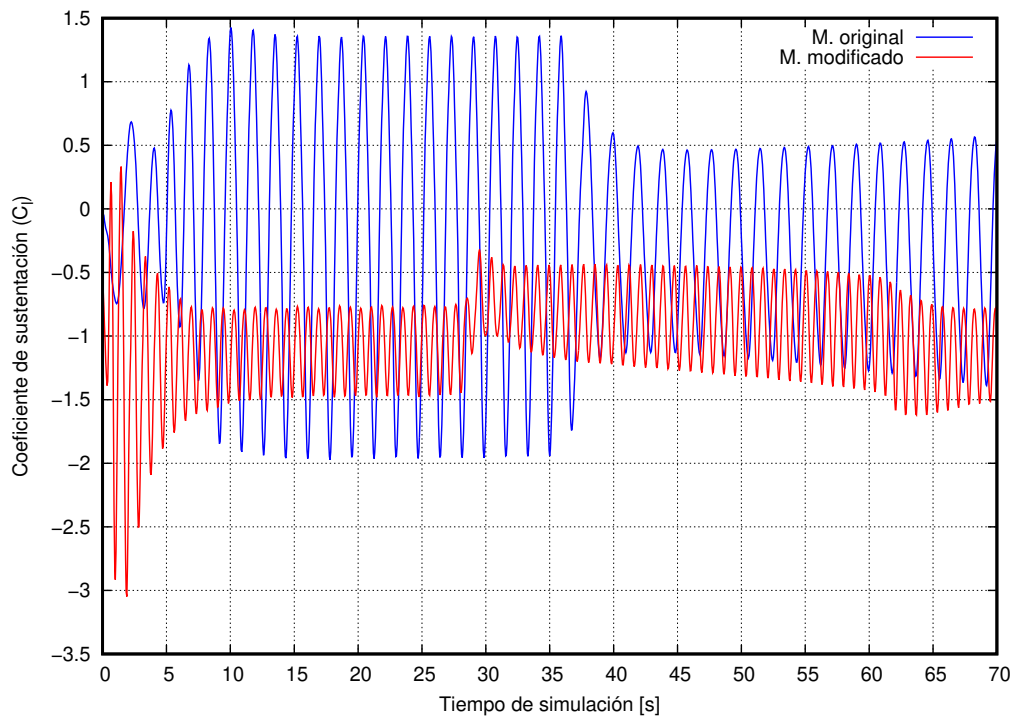


Figura 4.48: Comparación del (C_l) del modelo 1 de los modelos original y modificado a velocidad de 90 km h^{-1} .

La curva roja correspondiente al modelo 1 modificado disminuye su valor en $\sim 275 \%$.

Fuente: Los Autores

La fuerza de dragado en las carreteras es proporcional a la velocidad con que se moviliza, en cálculos anteriores para el modelo original, esta fuerza se incrementaba en porcentajes. En la tabla 4.45 se compara los resultados del modelo original con el modelo modificado y se observa que existe una disminución de valores en el coeficiente de dragado permitiendo que sea más aerodinámico al modelo modificado.

Tabla 4.45: Comparación de C_d de M1 entre modelo geométrico original y modificado a diferentes velocidades.

Variables	Resultados de comparación			
	Velocidad	M. original	M. modificado	Diferencia porcentual
Coeficiente de dragado	90 km h ⁻¹	0,8852	0,6265	29,23 %
	100 km h ⁻¹	0,9013	0,6352	29,52 %
	120 km h ⁻¹	0,9627	0,6453	32,97 %
Fuerza de dragado	90 km h ⁻¹	1169,57[N]	791,48[N]	32,33 %
	100 km h ⁻¹	1470,21[N]	990,84[N]	32,61 %
	120 km h ⁻¹	2261,44[N]	1449,29[N]	35,91 %
Coeficiente de sustentación	90 km h ⁻¹	-0,2575	-0,970	276,70 %
	100 km h ⁻¹	-0,2063	-0,961	365,83 %
	120 km h ⁻¹	-0,0926	-0,956	928,40 %
Fuerza de sustentación	90 km h ⁻¹	-340,28[N]	-1225,50[N]	260,15 %
	100 km h ⁻¹	-336,54[N]	-1499,05[N]	345,43 %
	120 km h ⁻¹	-217,55[N]	-2147,11[N]	886,95 %

Fuente: Los Autores

El magnitud del coeficiente de sustentación disminuye al cambiar la velocidad en $\sim 300\%$ y de igual manera la fuerza de sustentación, permitiendo tener mayor estabilidad en el modelo modificado.

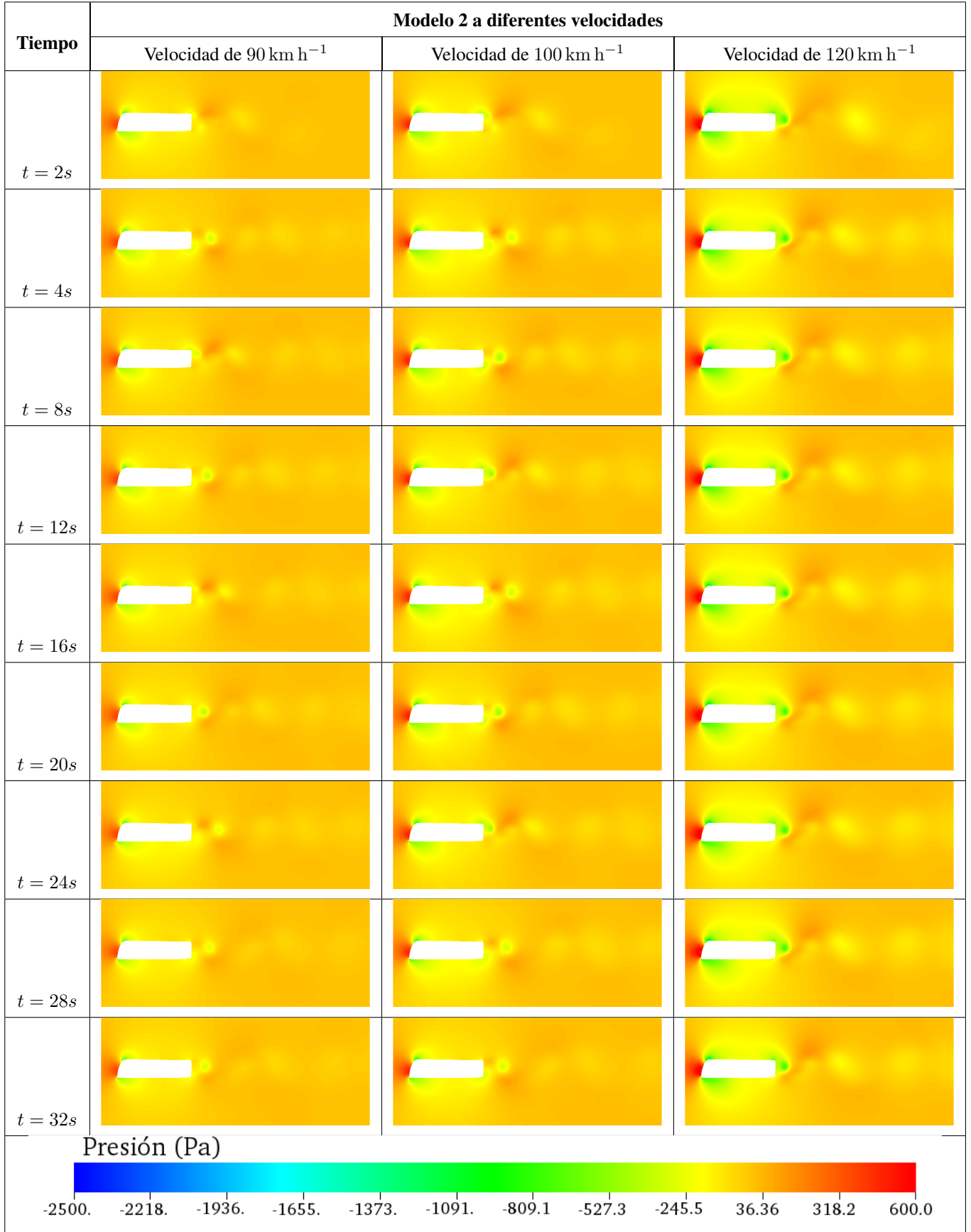
4.6.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 CON MODIFICACIONES

Para el modelo 2, se analiza la presión y vorticidad de las modificaciones en la geometría del modelo.

En la tabla 4.46, la tendencia de los anteriores ensayos se mantiene para el modelo 2, se observa que la presión se eleva en la parte frontal al aumentar la velocidad.

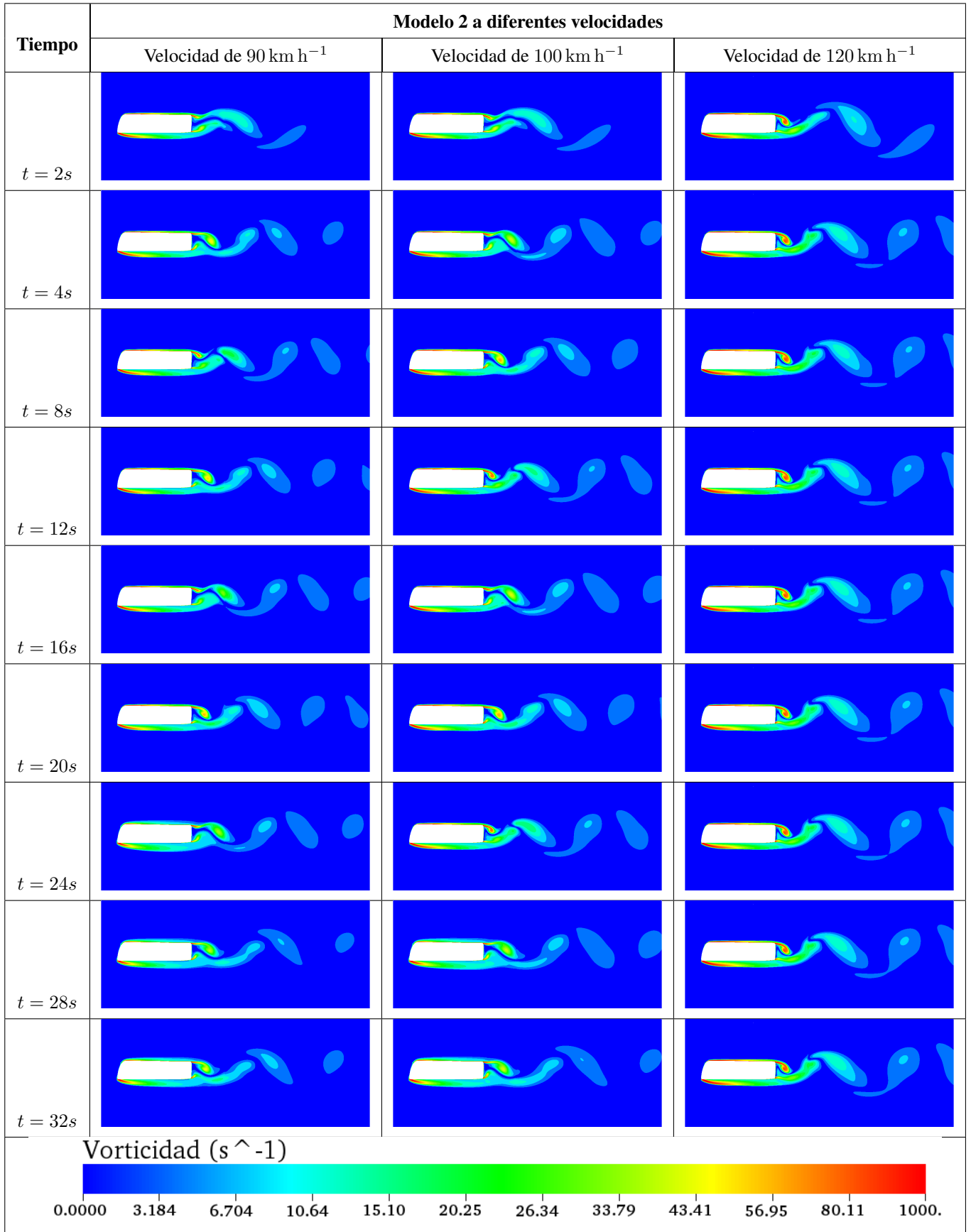
En la tabla 4.47, donde se muestra los gráficos de vorticidades para el modelo 2, resulta estimar que el flujo toma la forma de este modelo, y mientras se incrementa la velocidad, más vórtices se generan en la parte posterior del autobús. Se observa que en la parte superior de bus, la escala de colores para esta variable es entre 0 y 1000 s⁻¹.

Tabla 4.46: Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificaciones.



Fuente: Los Autores

Tabla 4.47: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificaciones.



Fuente: Los Autores

A continuación, en las figuras 4.49 y 4.50, muestran el comportamiento del coeficiente y fuerza de dragado respectivamente, se observa en las figuras que no varía de forma significativa el coeficiente de dragado al aumentar la velocidad del flujo, mientras la fuerza de dragado tiene un incremento con la velocidad.

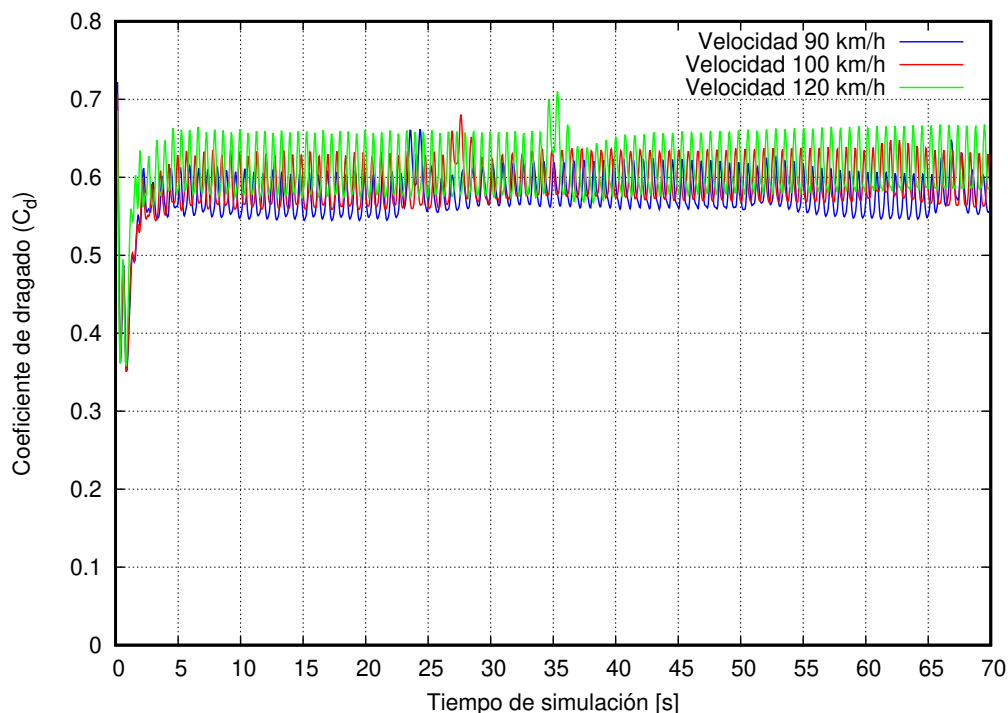


Figura 4.49: Coeficiente de dragado (C_d) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

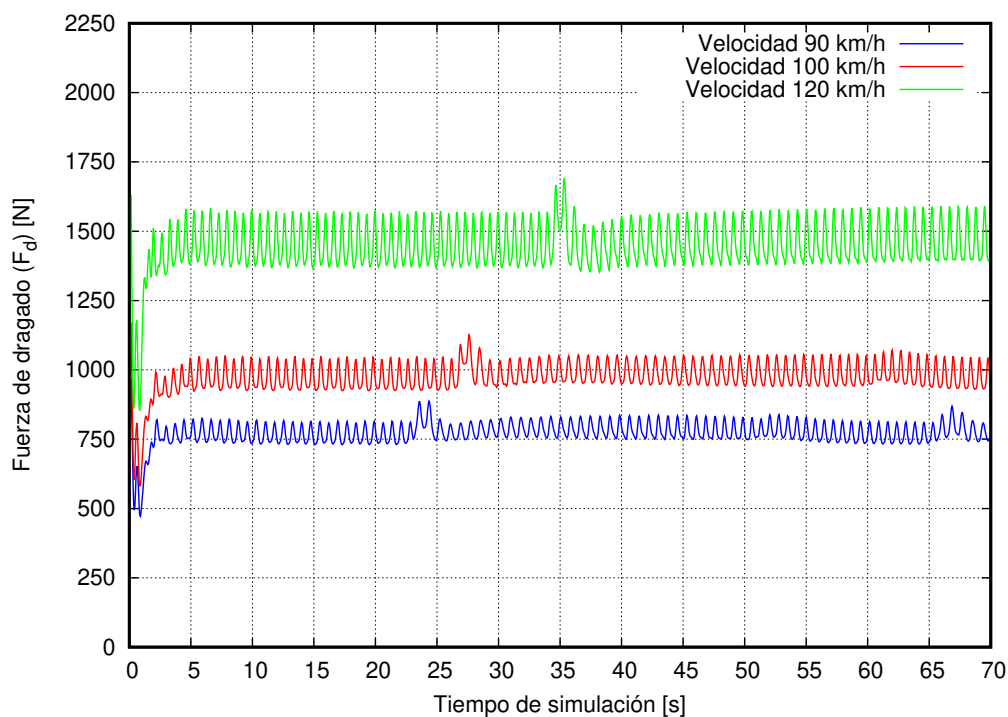


Figura 4.50: Fuerza de dragado (C_d) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

En la siguiente tabla 4.48 mostramos de manera numérica los resultados obtenidos para la geometría con modificaciones del modelo 2 en estudio.

Tabla 4.48: Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M2 modificado a diferentes velocidades.

Variables	Resultados a comparar			
	Velocidad	Modelo 2	Incremento porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de dragado	90 km h ⁻¹	0,5800	0,00 %	$\sigma = 0,023$
	100 km h ⁻¹	0,5934	2,31 %	$\sigma = 0,025$
	120 km h ⁻¹	0,6110	5,34 %	$\sigma = 0,030$
Fuerza de dragado	90 km h ⁻¹	777,53[N]	0,00 %	$\sigma = 30,43 [N]$
	100 km h ⁻¹	982,32[N]	26,34 %	$\sigma = 41,65 [N]$
	120 km h ⁻¹	1455,94[N]	87,25 %	$\sigma = 70,27 [N]$

Fuente: Los Autores

La tabla anterior muestra los resultados obtenidos de la simulación del modelo 2 con modificaciones antes mencionadas, donde la variación entre los resultados promediados a diferentes velocidades no varían de gran forma, así para 90 km h⁻¹ un $C_d = 0,58$ con una dispersión de resultados de 0,023, así no varían de la media aritmética calculada, mientras, para 100 km h⁻¹ y 120 km h⁻¹ su promedio es 0,5934 y 0,6110 respectivamente, manteniendo una desviación de 0,03.

La fuerza de dragado es otro parámetro de la resistencia que ejerce el aire a pasar por alrededor de la geometría, es así, para los 90 km h⁻¹ se promedia un valor de 777,53 [N] con una dispersión de resultados de 30,43 [N] siendo relativamente baja con respecto a la media, sin embargo, cuando sube la velocidad a 100 y 120 km h⁻¹ sus valores se incrementan en 26,34 % y 87,25 % respectivamente con respecto al valor de 90 km h⁻¹.

En las figuras 4.51 y 4.6.4, muestran el comportamiento aerodinámico del coeficiente y fuerza de sustentación.

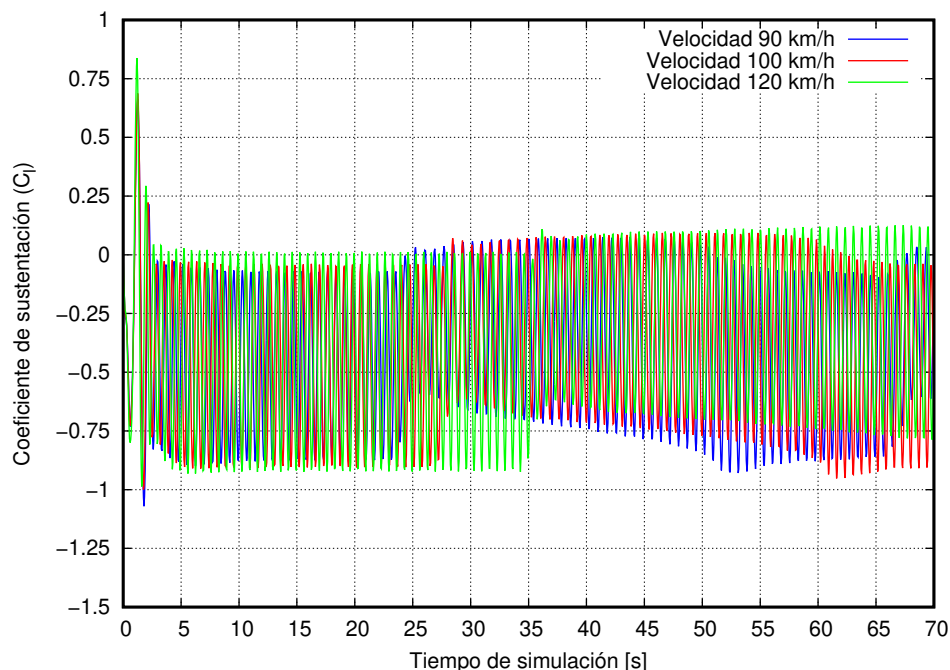


Figura 4.51: Coeficiente de sustentación (C_1) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h⁻¹, (rojo) Velocidad 100 km h⁻¹ y (verde) Velocidad de 120 km h⁻¹.

Fuente: Los Autores

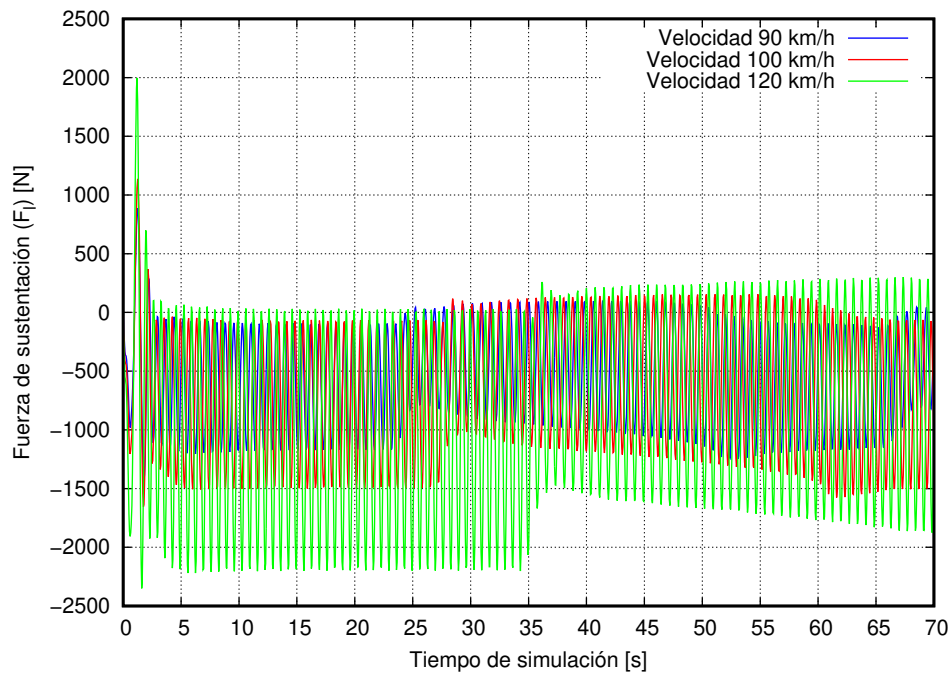


Figura 4.52: Fuerza de sustentación (F_1) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

El coeficiente y fuerza de sustentación, se incrementa mientras la velocidad del fluido pasa de 90 km h^{-1} a 100 km h^{-1} y a 120 km h^{-1} , oscilando dentro de un cierto tiempo y en un instante sus valores se incrementan por los gradientes de presión existentes en zonas de altas y bajas presiones donde las velocidades varían, haciendo variar estos resultados.

A continuación, se muestran los resultados de manera numérica para poder entender como ha influido las modificaciones realizadas a la geometría original.

Tabla 4.49: Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M2 modificado a diferentes velocidades.

Variables	Resultados a comparar		
	Velocidad	Modelo 2	Desviación estándar
Coeficiente de sustentación	90 km h^{-1}	-0,3979	$\sigma = 0,291$
	100 km h^{-1}	-0,3892	$\sigma = 0,310$
	120 km h^{-1}	-0,3634	$\sigma = 0,318$
Fuerza de sustentación	90 km h^{-1}	-521,73[N]	$\sigma = 390,40 [N]$
	100 km h^{-1}	-658,73[N]	$\sigma = 512,85 [N]$
	120 km h^{-1}	-865,98[N]	$\sigma = 757,95 [N]$

Fuente: Los Autores

4.6.4.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE GEOMETRÍA ORIGINAL Y MODIFICADA DEL MODELO 2 EN ESTUDIO.

Para interpretar los resultados de las simulaciones numéricas, se realiza una comparación entre el modelo original y modificado, se espera obtener un mejor rendimiento, sin embargo, de no ser así se pensaría que dichas modificaciones no son las adecuadas para reducir el efecto de las fuerzas aerodinámicas creado alrededor de la geometría. A continuación, se presenta una comparación gráfica de las curvas entre el modelo 2 original y el modificado.

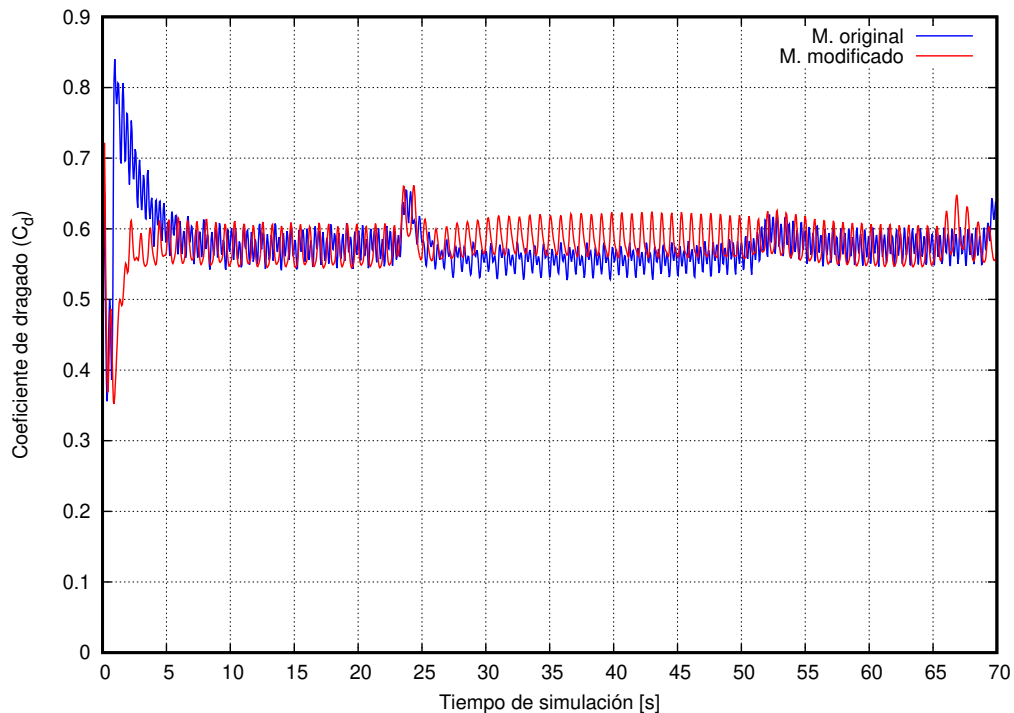


Figura 4.53: Comparación del (C_d) del modelo 2 de los modelos original y modificado a velocidad de 90 km h^{-1} . La curva roja correspondiente al modelo 2 modificado incrementa su valor en $\sim 1,50 \%$.

Fuente: Los Autores

En la figura 4.53, se representa las curvas que forman el coeficiente de dragado con respecto al tiempo, es así que en un instante de tiempo el valor sobrepasa el valor en el que oscila por un tiempo, pero luego desciende y vuelve a mantenerse.

En la tabla 4.50, se compara los resultados entre los modelos original y modificado las variables de coeficiente y la fuerza de dragado, donde se observa que dichos valores se incrementan con el modelo modificado. Para una velocidad de 90 km h^{-1} , el C_d se incrementa en $1,52 \%$, para los 100 km h^{-1} este incremento es de $3,39 \%$, y para los 120 km h^{-1} hay un incremento de $5,55 \%$, dichas modificaciones realizadas al modelo original no son las adecuadas. La fuerza de dragado es otro parámetro que se incrementó con las modificaciones realizadas siendo erróneas para mejorar dicho modelo.

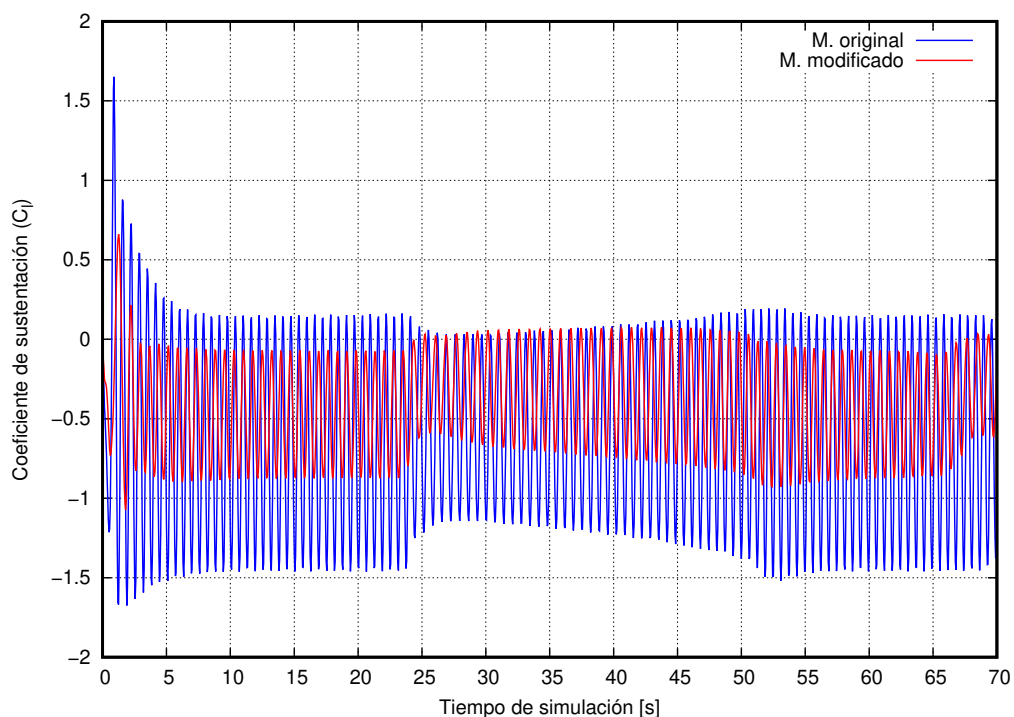


Figura 4.54: Comparación del (C_1) del modelo 2 de los modelos original y modificado a velocidad de 90 km h^{-1} .

La curva roja correspondiente al modelo 2 modificado incrementa su valor en $\sim 30\%$.

Fuente: Los Autores

Tabla 4.50: Comparación de C_d de M2 entre modelo geométrico original y modificado a diferentes velocidades.

Variables	Resultados de comparación			
	Velocidad	M. original	M. modificado	Diferencia porcentual
Coeficiente de dragado	90 km h^{-1}	0,5712	0,5800	1,52 %
	100 km h^{-1}	0,5733	0,5934	3,39 %
	120 km h^{-1}	0,5771	0,6110	5,55 %
Fuerza de dragado	90 km h^{-1}	757,38[N]	777,53[N]	2,66 %
	100 km h^{-1}	938,54[N]	982,32[N]	4,66 %
	120 km h^{-1}	1360,02[N]	1455,94[N]	7,05 %
Coeficiente de sustentación	90 km h^{-1}	-0,6030	-0,3979	34,01 %
	100 km h^{-1}	-0,5990	-0,3892	35,03 %
	120 km h^{-1}	-0,5810	-0,3634	37,45 %
Fuerza de sustentación	90 km h^{-1}	-799,60[N]	-521,73[N]	34,75 %
	100 km h^{-1}	-981,33[N]	-658,73[N]	33,87 %
	120 km h^{-1}	-1370,10[N]	-865,98[N]	36,80 %

Fuente: Los Autores

4.7. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE MODELOS DE ESTUDIO CON LLANTAS

4.7.1. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 SIN MODIFICACIONES

Una vez que hemos analizado los modelos geométricos de autobuses de los modelos 1 y 2 con un corte en la mitad de forma longitudinal, es decir para este estudio no se consideró las llantas para poder analizar si el uso de las llantas en los autobuses permiten tener mayor o menor estabilidad y cuánto afecta a los parámetros aerodinámicos. En la presente sección se reportará los resultados del estudio de los modelos 1 y 2 con llantas a diferentes velocidades para poder realizar las comparaciones entre modelos geométricos con y sin llantas.

A continuación, en la figura 4.55, se muestra el comportamiento que tiene el C_d en función del tiempo. Existe un tiempo de 15 [s] para que los resultados se estabilicen. Sin embargo, desde los 20 [s] hasta los 30 [s] hay una zona de baja presión en la parte de adelante del autobús, haciendo que la velocidades sean mayores en ese punto y por ende incrementando la resistencia al avance, luego de un lapso de 30 [s] el velocidad flujo tiende a descender creando zonas de alta presión haciendo que desfavorezca a la resistencia de avance disminuya y se mantenga estable durante alrededor de 10 [s]. Este fenómeno ocurre en las diferentes velocidades variando el tiempo en que se produce. Para poder entender el fenómeno mencionado se muestran gráficas de presión y vorticidad a diferentes tiempos, tablas 4.51 y 4.52 respectivamente.

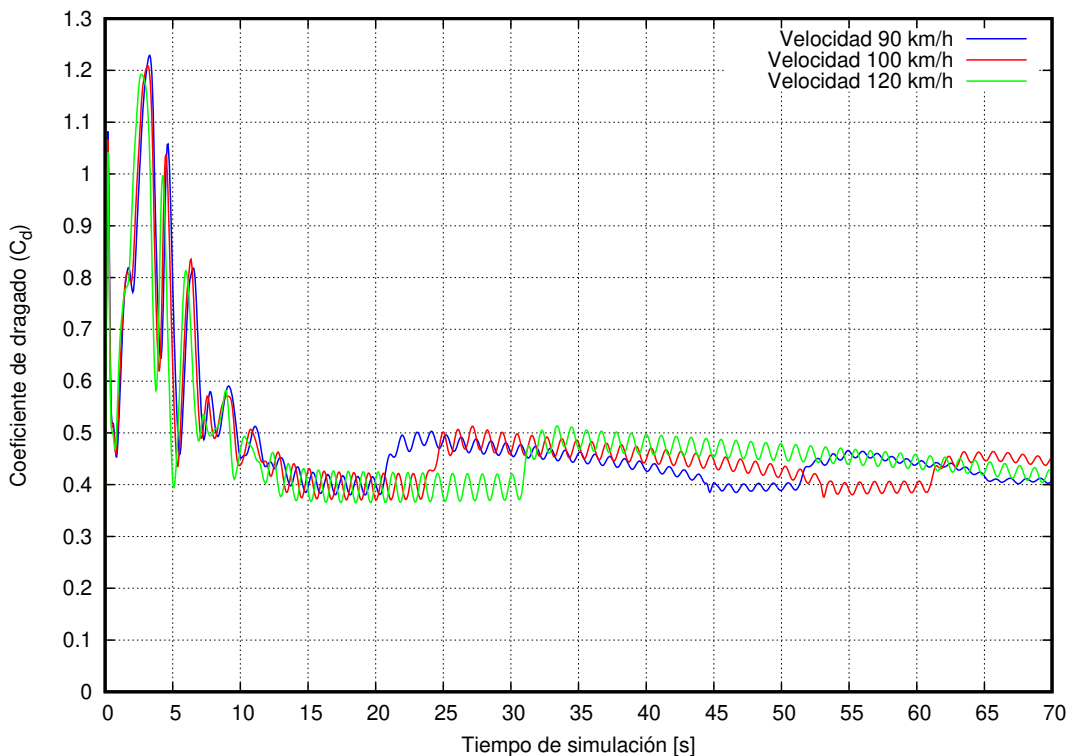
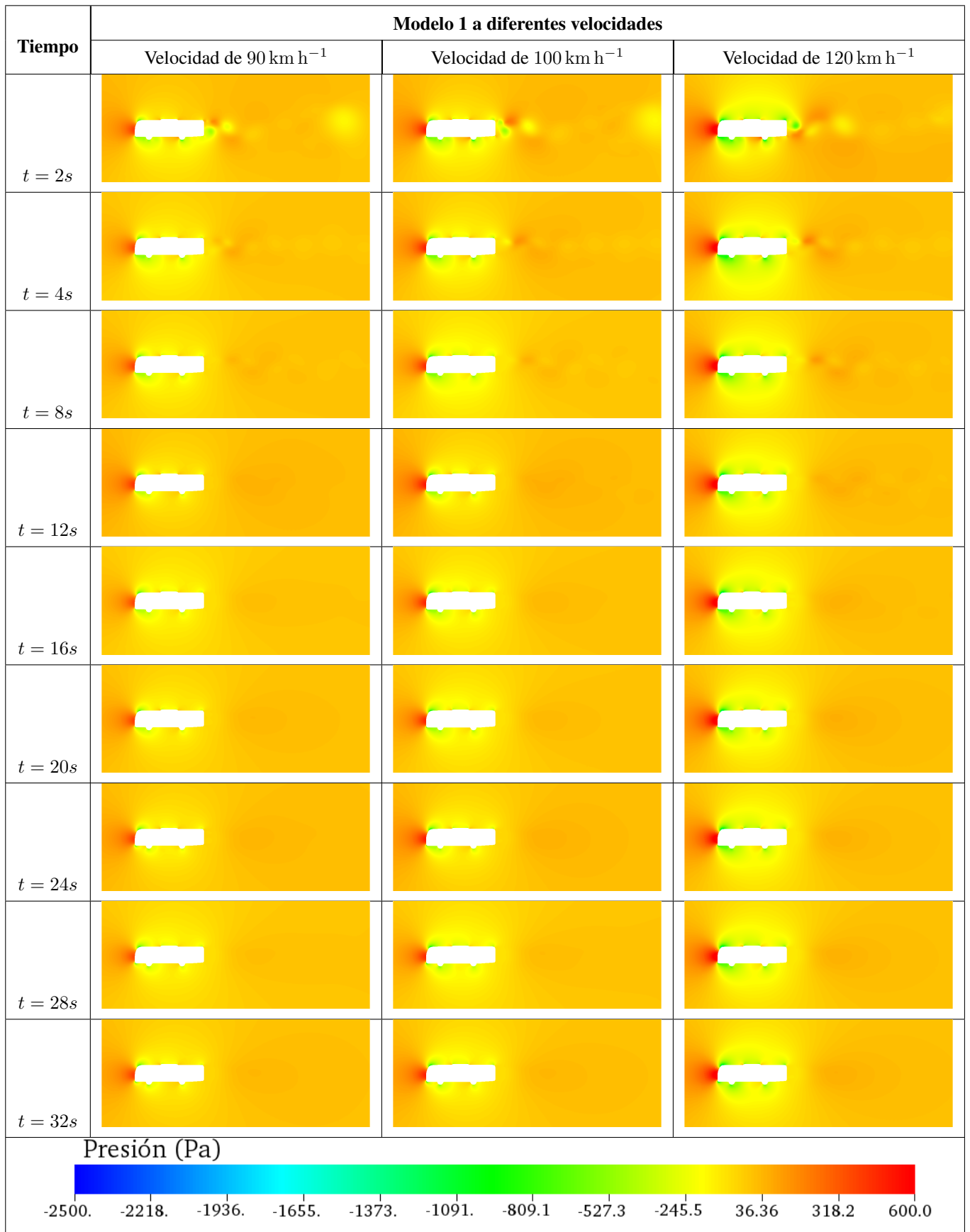


Figura 4.55: Coeficiente de arrastre (C_d) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

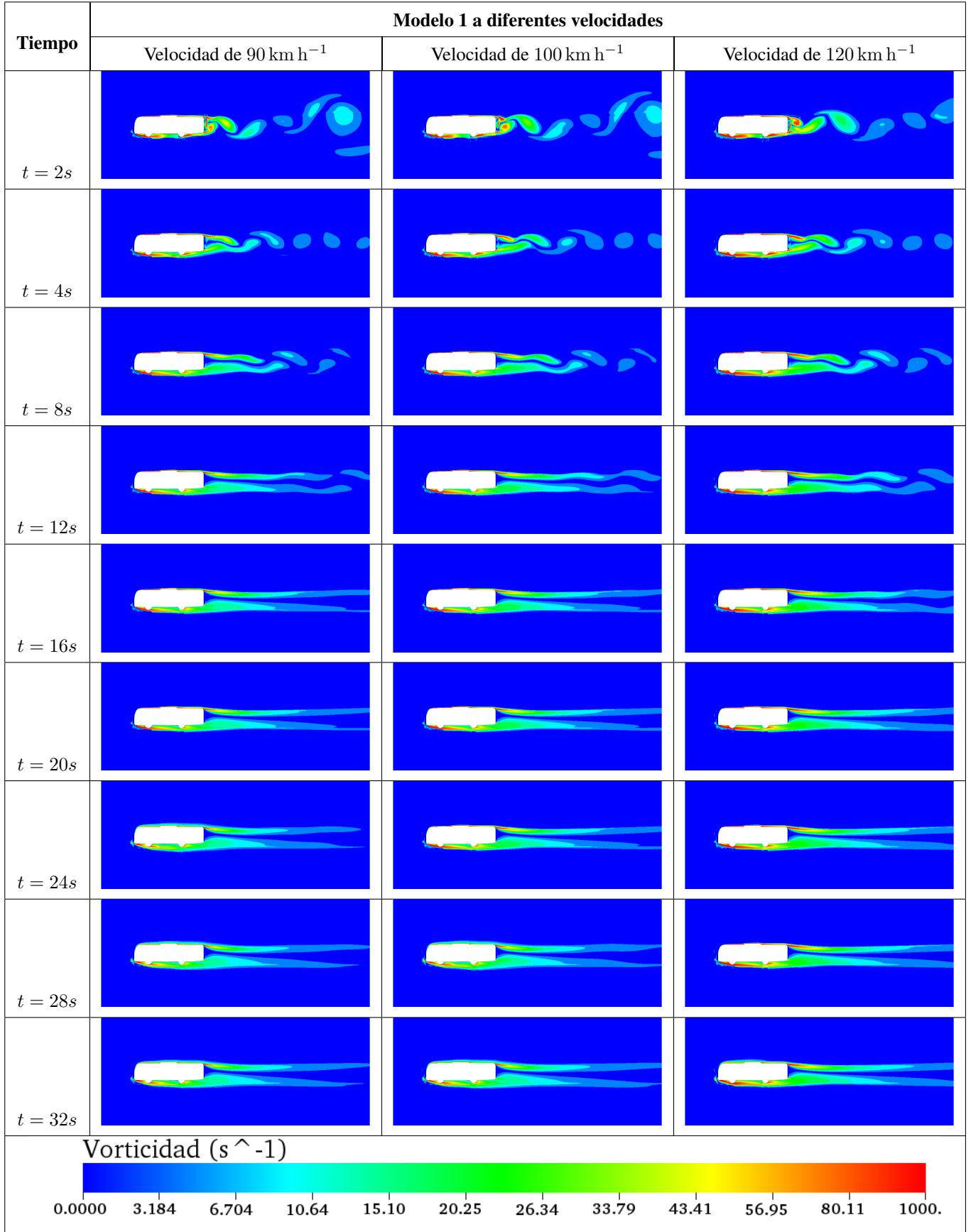
Fuente: Los Autores

Tabla 4.51: Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades sin modificación con llantas



Fuente: Los Autores

Tabla 4.52: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades sin modificación con llantas



Fuente: Los Autores

La tabla 4.51, muestra el modelo 1 con llantas para las diferentes velocidades, se genera desbalances de presiones en las diferentes partes del autobús hasta que el flujo se estabilice y pueda adoptar un valor de presión en los diferentes puntos, es evidente que en la parte frontal del autobús la presión es mayor creando zonas de alta presión y velocidades bajas, la presión alta indica la energía necesaria para separar las moléculas del aire. En la parte inferior de la llanta trasera se observan zonas de baja presión formando un gradiente de adverso al tener presión baja y velocidad altas en eso puntos, esto se debe al flujo que choca directamente con esa superficie y el flujo de aire no se puede disipar con facilidad.

En la tabla 4.53, está el análisis numérico del coeficiente y fuerza de dragado. Además se muestran el incremento al subir la velocidad desde 90 a 120 km h⁻¹ y la desviación estándar de resultados.

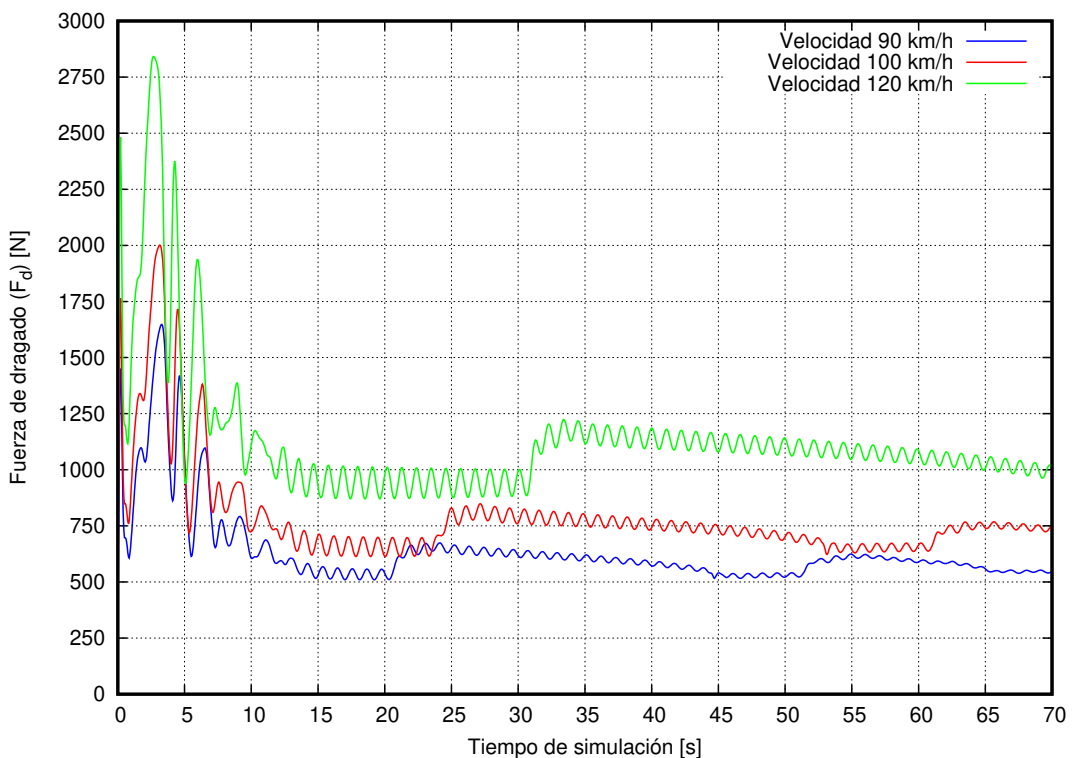


Figura 4.56: Fuerza de dragado (F_d) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h⁻¹, (rojo) Velocidad 100 km h⁻¹ y (verde) Velocidad de 120 km h⁻¹.

Fuente: Los Autores

Tabla 4.53: Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M1 con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 1	Incremento porcentual	Desviación estándar
Coficiente de dragado	90 km h ⁻¹	0,4338	0,00 %	$\sigma = 0,0291$
	100 km h ⁻¹	0,4365	0,65 %	$\sigma = 0,0324$
	120 km h ⁻¹	0,4367	0,64 %	$\sigma = 0,0375$
Fuerza de dragado	90 km h ⁻¹	581,52[N]	0,00 %	$\sigma = 38,98 [N]$
	100 km h ⁻¹	722,61[N]	24,26 %	$\sigma = 53,67 [N]$
	120 km h ⁻¹	1040,23[N]	78,88 %	$\sigma = 89,26 [N]$

Fuente: Los Autores

Como se había mencionada otro parámetro aerodinámico a considerar es el coeficiente y fuerza de sustentación, es por ello, la figura 4.57 y 4.58 muestran el comportamiento que tiene durante el tiempo de simulación.

En la figura del C_1 el valor promedio es aproximadamente cero cuando este tiene llantas, de cierta forma las llantas nos permiten tener menor resistencia al avance pero esto hace que tenga una menor estabilidad para el modelo 1 a diferentes velocidades, lo mismo sucede para la fuerza de sustentación, pues dicha fuerza permite al autobús a tener un mejor agarre entre el suelo y las llantas.

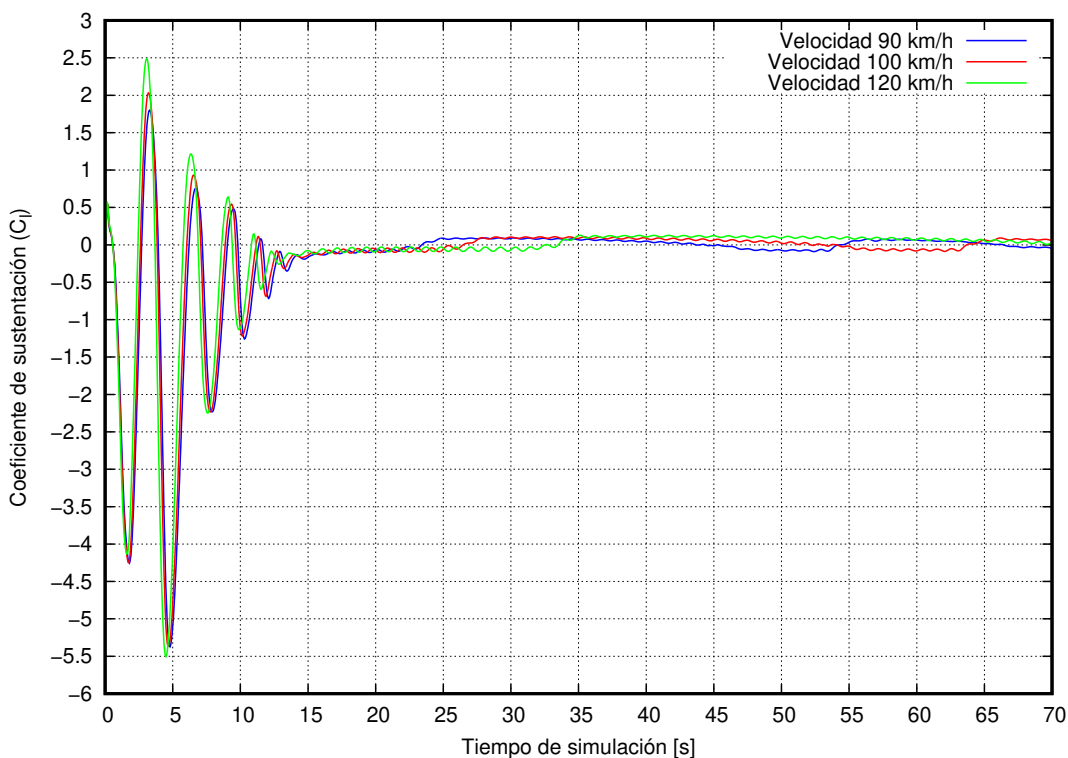


Figura 4.57: Coeficiente de sustentación (C_1) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.54: Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M1 con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 1	Incremento porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de sustentación	90 km h^{-1}	0,0067	0,00 %	$\sigma = 0,0633$
	100 km h^{-1}	0,0191	184,70 %	$\sigma = 0,0694$
	120 km h^{-1}	0,0345	415,19 %	$\sigma = 0,0736$
Fuerza de sustentación	90 km h^{-1}	11,06[N]	0,00 %	$\sigma = 70,83 [N]$
	100 km h^{-1}	31,59[N]	185,66 %	$\sigma = 53,67 [N]$
	120 km h^{-1}	82,32[N]	463,76 %	$\sigma = 89,26 [N]$

Fuente: Los Autores

En tabla 4.54, se muestra C_1 y F_1 para el modelo 1 con llantas en donde el coeficiente de sustentación se va acercando a cero, significa que mientras mas bajo dicho valor es de gran ayuda para los modelos.

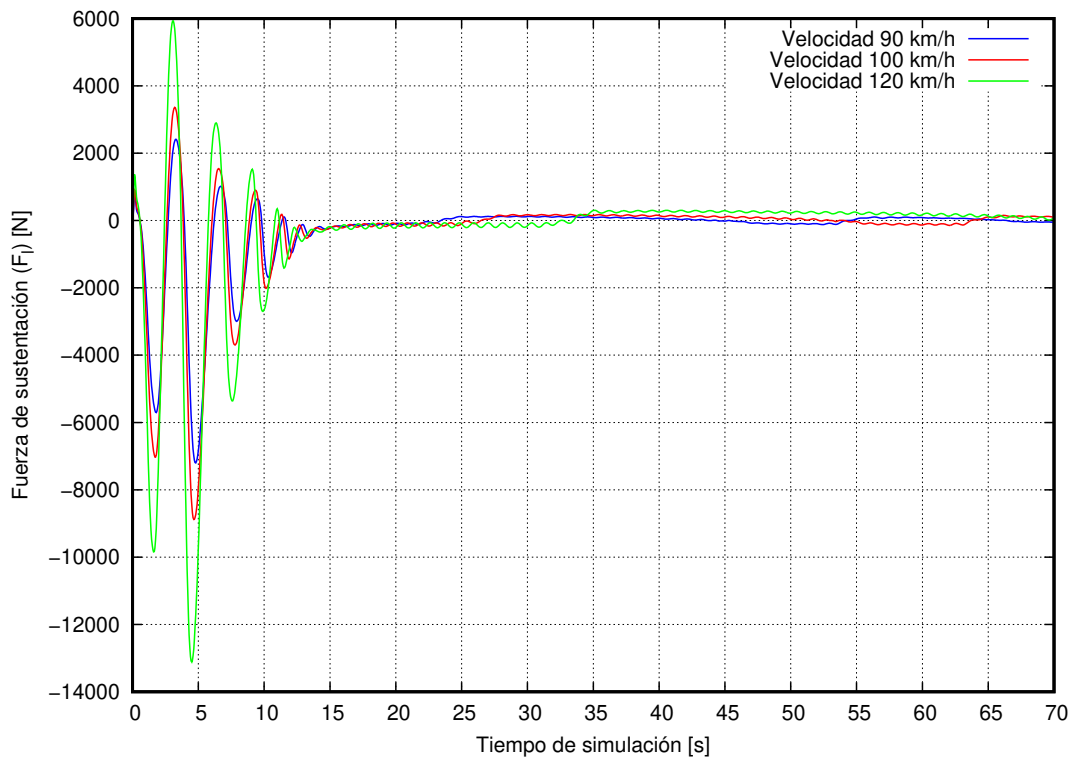


Figura 4.58: Fuerza de sustentación (F_1) de M1 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

4.7.2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 1 CON MODIFICACIONES

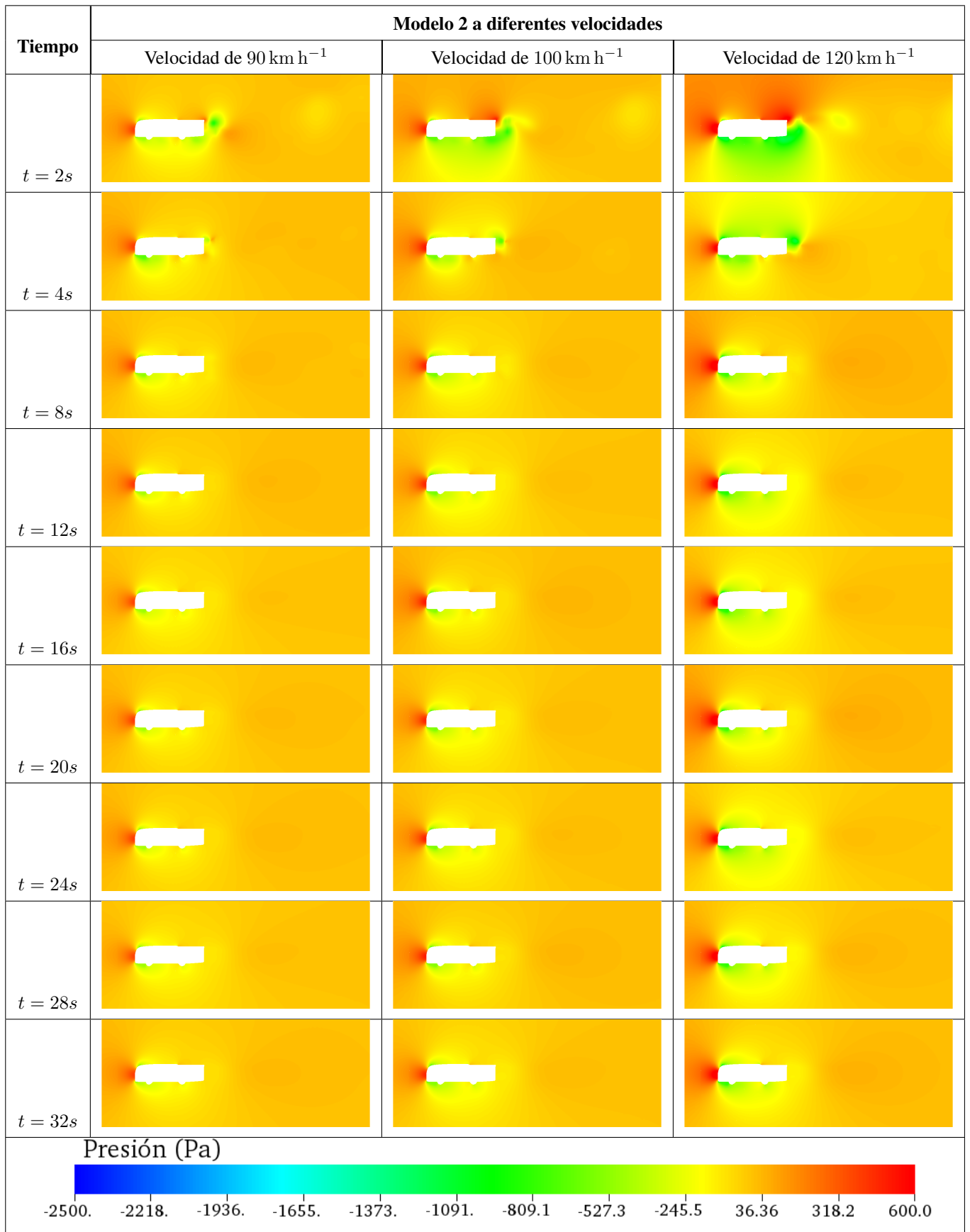
En los anteriores resultados del comportamiento que tiene el modelo 1 sin modificaciones, el uso de las llantas dentro de la simulación ha tenido una influencia notoria en todos los parámetros aerodinámicos, por esta razón, ahora se presentan los resultados obtenidos para el modelo 1 con modificaciones manteniendo los mismos criterios usados para las simulaciones anteriores.

Así mismo, se reportan resultados del coeficiente y fuerza de dragado, el coeficiente y fuerza de sustentación, con su análisis matemático expresando valores promedios y dispersiones.

En la tabla 4.55, se muestra el comportamiento de la presión del autobús a diferentes velocidades y en diferentes instantes de la simulación. Las zonas de alta presión se evidencia en todas las gráficas y este se incrementa al aumentar la velocidad, de igual manera las zonas de baja presión se hacen más notorias con la velocidad formando gradientes de presión favorables sobre el autobús además, esto ayuda a evitar el desprendimiento de flujo en la parte posterior del modelo.

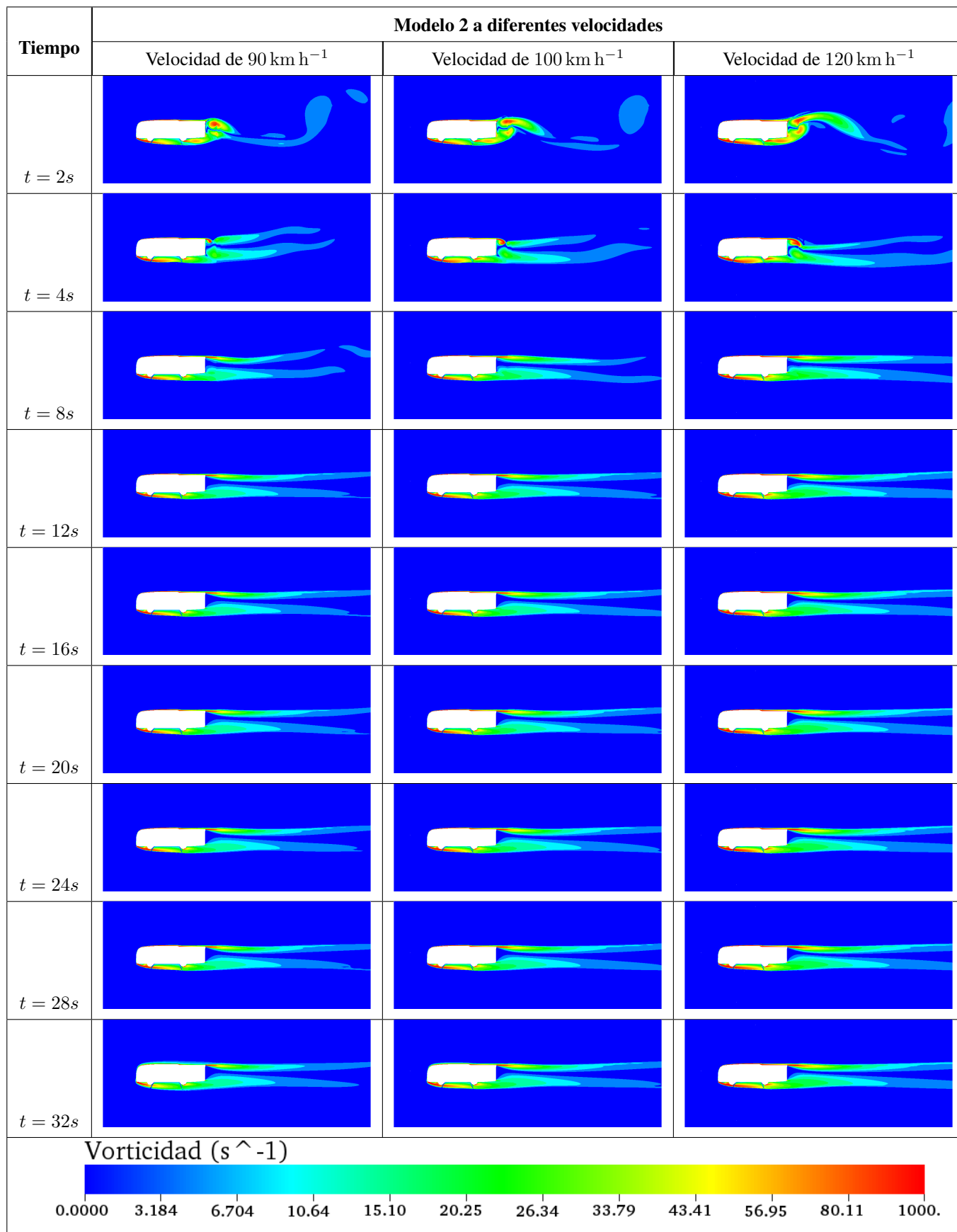
Todo lo antes mencionado se puede observar de mejor manera en la tabla 4.56, donde también se observa una zona de recirculación donde las moléculas de aire tratan de llenar el espacio dejado por el objeto, conocido como vacío posterior.

Tabla 4.55: Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades con modificación y llantas



Fuente: Los Autores

Tabla 4.56: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 1 a diferentes velocidades con modificación y llantas



Fuente: Los Autores

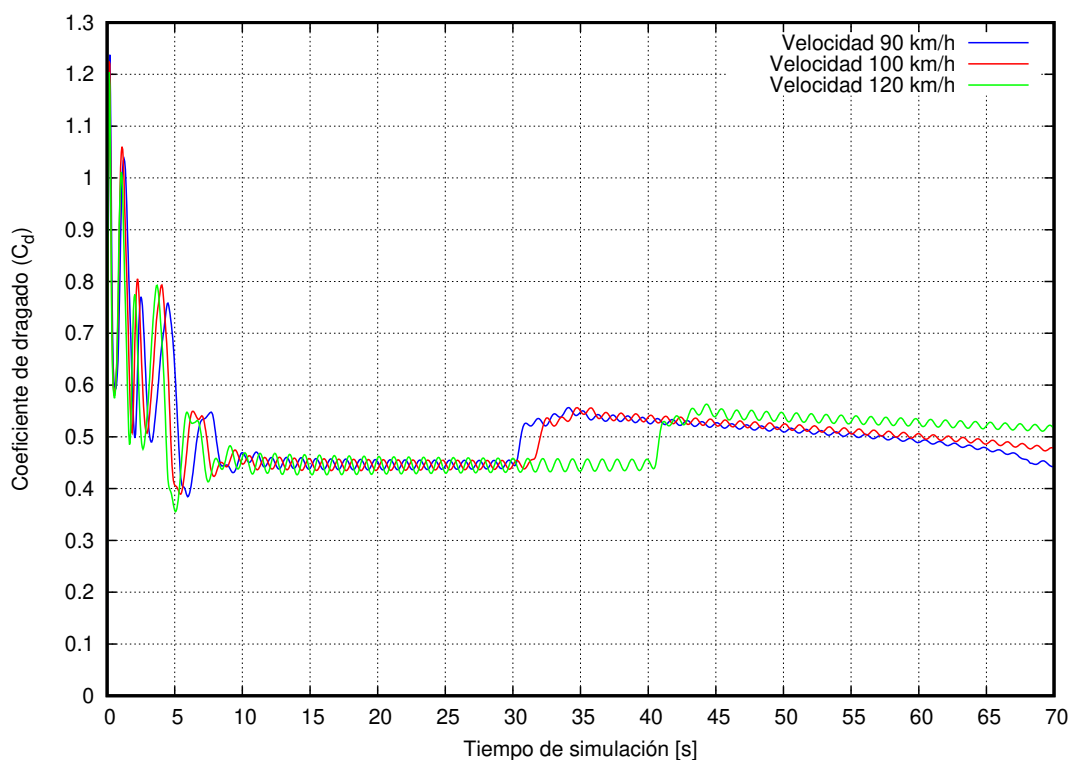


Figura 4.59: Coeficiente de dragado (C_d) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.57: Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M1 modificado con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 1	Incremento porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de dragado	90 km h^{-1}	0,4869	0,00 %	$\sigma = 0,0363$
	100 km h^{-1}	0,4910	0,84 %	$\sigma = 0,03261$
	120 km h^{-1}	0,4938	1,22 %	$\sigma = 0,0429$
Fuerza de dragado	90 km h^{-1}	652,75[N]	0,00 %	$\sigma = 48,62 \text{ [N]}$
	100 km h^{-1}	812,67[N]	24,50 %	$\sigma = 59,71 \text{ [N]}$
	120 km h^{-1}	1174,36[N]	79,91 %	$\sigma = 102,17 \text{ [N]}$

Fuente: Los Autores

La figura 4.59, durante los primeros 10 [s] se puede observar fluctuaciones, esto sucede por que el flujo de aire choca con las paredes del autobús existiendo altos y bajos al paso de aire, cuando el flujo se estabiliza y a la velocidad de 90 km h^{-1} el C_d es 0,4869 a 100 km h^{-1} es 0,4910 y a 120 km h^{-1} es 0,4938.

La fuerza de dragado es directamente proporcional al C_d esto quiere decir que mientras mayor sea este, la fuerza de dragado se incrementa. Esto ocurre al mismo tiempo que sube el C_d siendo mayor para una velocidad de 120 km h^{-1} , con un incremento de 80 % aproximadamente con relación la fuerza obtenida a con una velocidad de 90 km h^{-1} , haciendo que la fuerza tenga un valor de 1174 [N] con una dispersión de resultados de 102 [N] que comparada al valor promedio es muy baja.

El coeficiente y fuerza de sustentación en el modelo con modificaciones tiene un comportamiento diferente al modelo 1 sin modificaciones. Es así que en las figuras 4.61 y 4.62 denotan tener un valor bajo cero esto aumenta la

resistencia de aire pero la fuerza de estabilidad se incrementa, caso contrario sucede en el modelo 1 sin modificaciones con llantas sea estable.

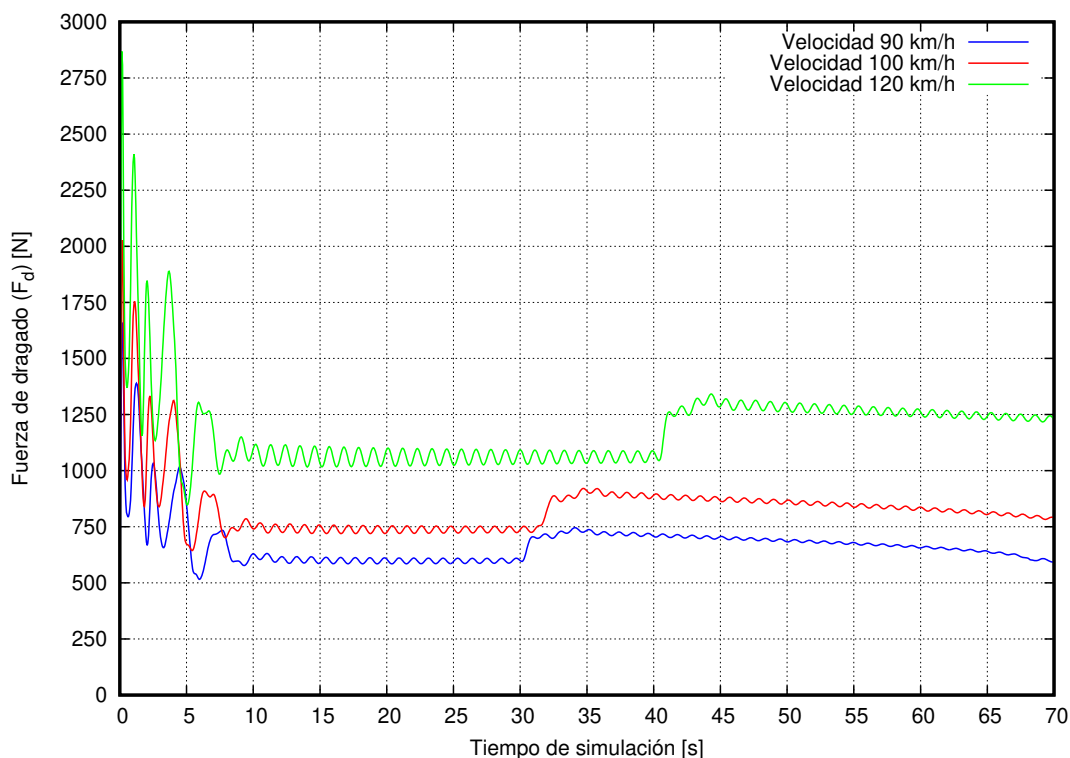


Figura 4.60: Fuerza de dragado (F_d) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.58: Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M1 modificado con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 1	Diferencia porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de sustentación	90 km h^{-1}	-0,6630	0,00 %	$\sigma = 0,0696$
	100 km h^{-1}	-0,6551	-1,19 %	$\sigma = 0,0689$
	120 km h^{-1}	-0,6659	0,45 %	$\sigma = 0,0798$
Fuerza de sustentación	90 km h^{-1}	-888,78[N]	0,00 %	$\sigma = 90,83 \text{ [N]}$
	100 km h^{-1}	-1084,26[N]	21,90 %	$\sigma = 114,00 \text{ [N]}$
	120 km h^{-1}	-1586,81[N]	78,54 %	$\sigma = 190,10 \text{ [N]}$

Fuente: Los Autores

En la tabla 4.58, mostramos los valores del coeficiente y fuerza de sustentación la particularidad de dichos valores es que sus valores son negativos y pues indica que la fuerza esta en dirección favorable a la gravedad.

De la misma forma la fuerza de sustentación al tener un signo negativo indica la dirección de la magnitud creando así un coeficiente negativo como muestra la tabla.

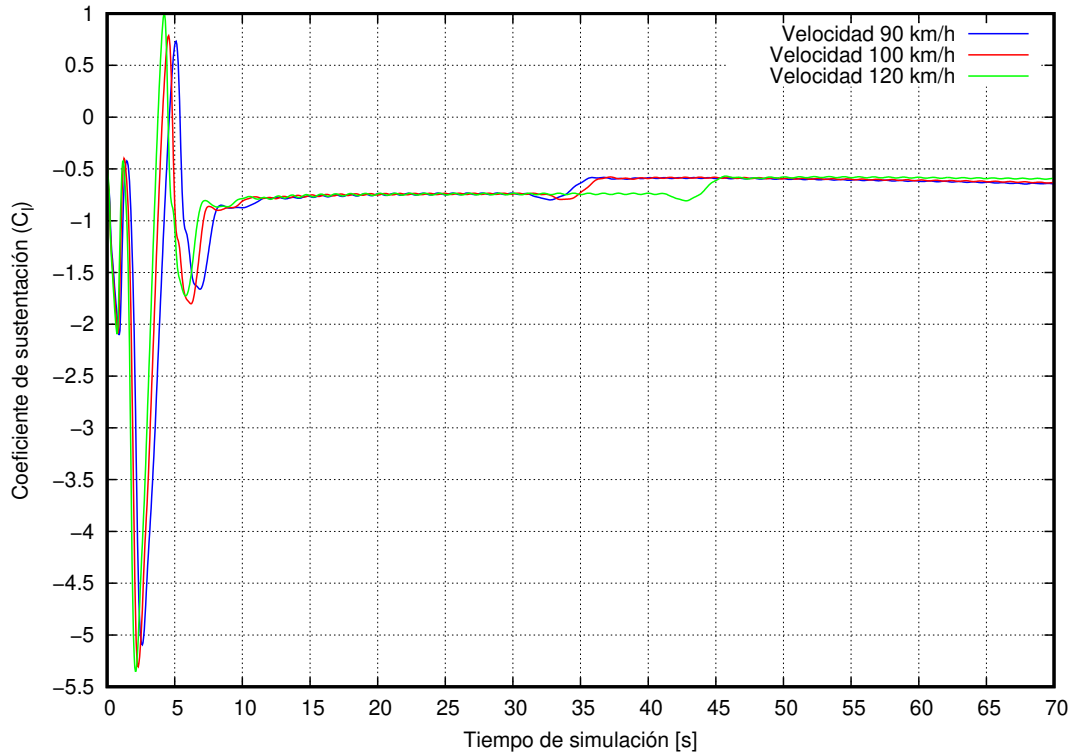


Figura 4.61: Coeficiente de sustentación (C_l) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

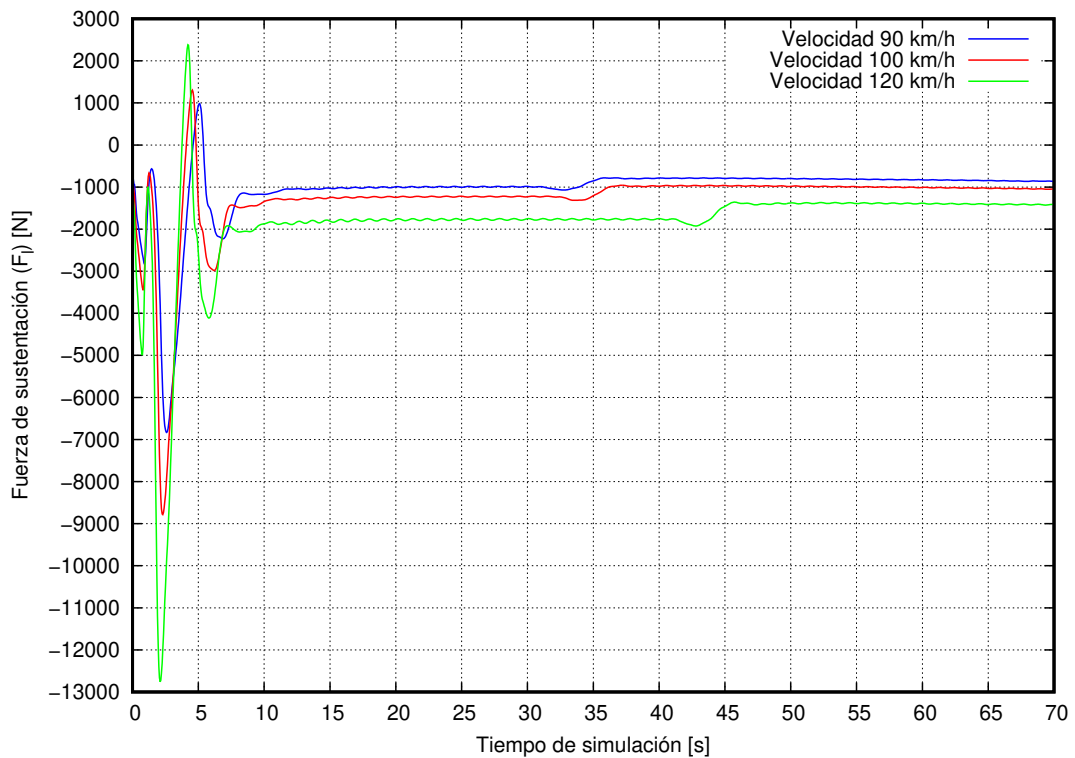


Figura 4.62: Fuerza de sustentación (F_l) de M1 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

4.7.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELO 1 CON Y SIN MODIFICACIONES, CON Y SIN LLANTAS

Una vez terminado el análisis numérico del modelo 1 con todos los casos analizados, contrastando el comportamiento aerodinámico entre ellos a diferentes velocidades.

La figura 4.65 y 4.66 describen el comportamiento del coeficiente de dragado y del coeficiente de sustentación del modelo 1 original con y sin llantas a la velocidad de 90 km h^{-1} .

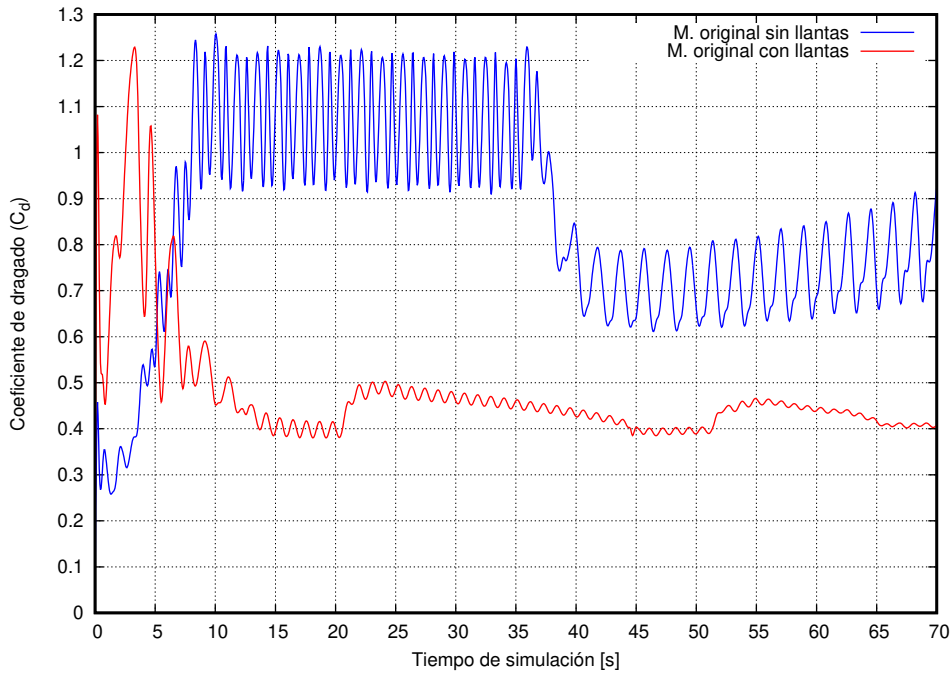


Figura 4.63: Contraste del (C_d) de M1 sin modificaciones, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

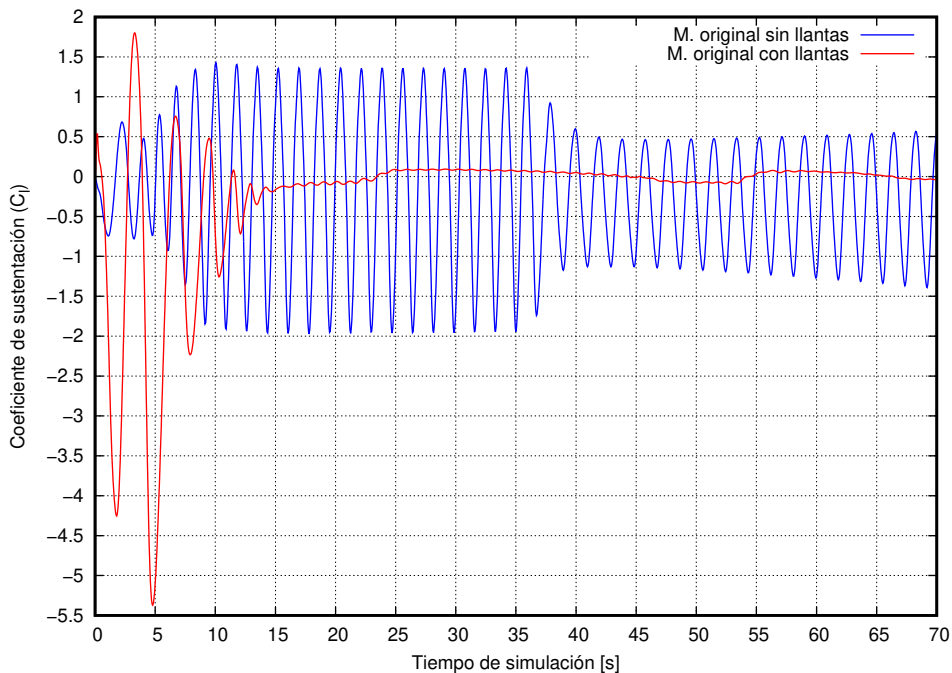


Figura 4.64: Contraste del (C_l) de M1 sin modificaciones, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

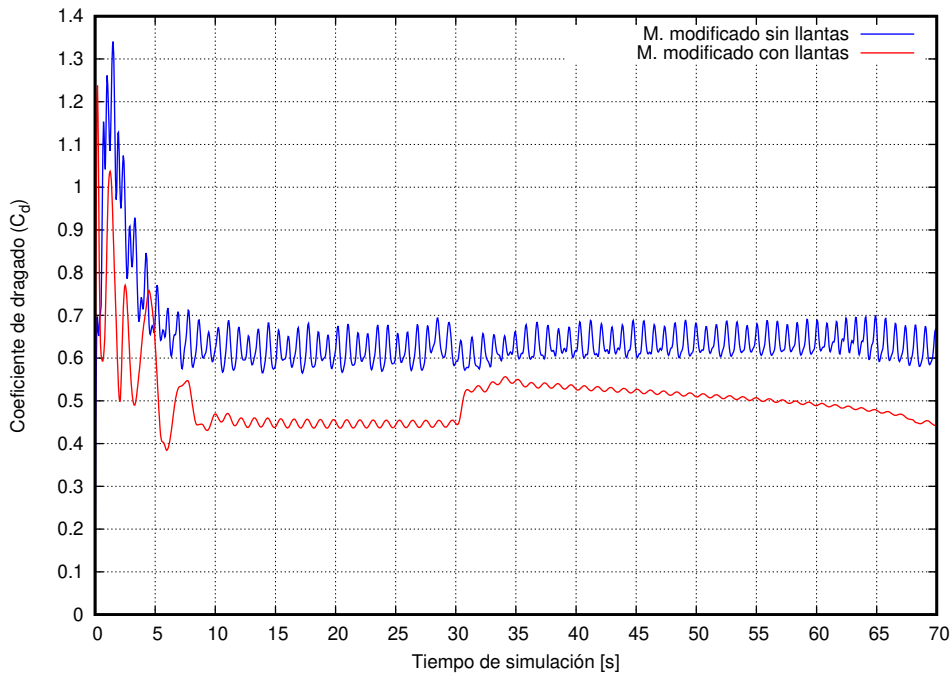


Figura 4.65: Contraste del (C_d) de M1 modificado, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

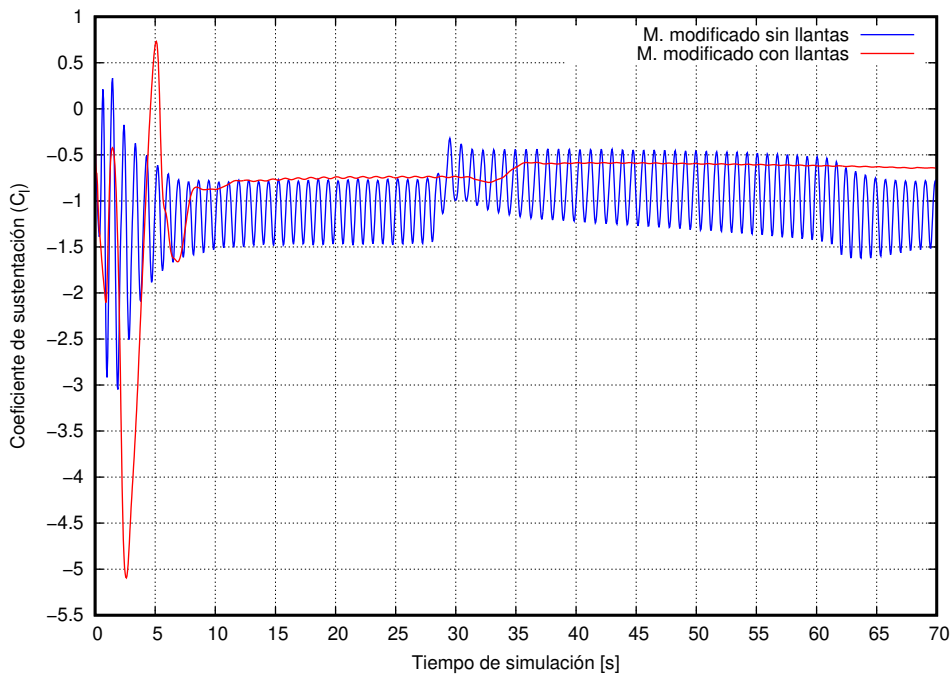


Figura 4.66: Contraste del (C_l) de M1 modificado, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

A continuación, en la tabla 4.59, muestra como han ido cambiando los parámetros aerodinámicos mientras se cambia la velocidad del fluido en el ingreso y su porcentaje de variación entre los modelos.

Acotando los resultados obtenidos se observa para el modelo 1 sin modificaciones considerando las llantas en su geometría, el coeficiente y fuerza de dragado reduce en $\sim 50\%$ en contraste con el modelo 1 sin modificaciones con llantas, es decir, la presencia de las llantas en el modelo son significativas. Sin embargo, el coeficiente y fuerza de sustentación incrementa su valor en el modelo 1 sin modificaciones con llantas, haciendo al modelo inestabilidad.

Para el modelo 1 con modificaciones considerando las llantas es la geometría el coeficiente y fuerza de dragado disminuye en $\sim 21\%$ comparando con el modelo 1 modificado sin llantas, es decir, las llantas marcaron la diferencia en la comparación, estimando un ahorro de combustible (ver sección 4.8). Sin embargo, el coeficiente y fuerza de sustentación el modelo modificado sin llantas presenta menor valor, y el modelo modificado con llantas un mayor valor con un incremento de $\sim 29\%$.

Tabla 4.59: Comparación de parámetros aerodinámicos para M1 con y sin modificaciones, con y sin llantas a diferentes velocidades.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS							
Variable	Velocidad	Modelo 1 sin modificaciones		Diferencia porcentual	Modelo 1 con modificaciones		Diferencia porcentual
		M1 sin llantas	M1 con llantas		M1 sin llantas	M1 con llantas	
Coeficiente de dragado	90 km h ⁻¹	0.8852	0.4338	51.00 %	0.6265	0.4869	22.28 %
	100 km h ⁻¹	0.9013	0.4366	51.56 %	0.6352	0.4910	22.70 %
	120 km h ⁻¹	0.9627	0.4365	54.66 %	0.6453	0.4928	23.63 %
Fuerza de dragado [N]	90 km h ⁻¹	1169.57	581.52	50.28 %	791.48	652.75	17.53 %
	100 km h ⁻¹	1470.21	722.61	50.85 %	990.84	812.67	17.98 %
	120 km h ⁻¹	2261.44	1040.23	54.00 %	1449.29	1174.36	18.97 %
Coeficiente de sustentación	90 km h ⁻¹	-0.2575	0.0067	102.60 %	-0.9700	-0.6630	31.65 %
	100 km h ⁻¹	-0.2063	0.0191	109.25 %	-0.9611	-0.6551	31.84 %
	120 km h ⁻¹	-0.0926	0.0345	137.30 %	-0.9560	-0.6659	30.34 %
Fuerza de sustentación [N]	90 km h ⁻¹	-340.28	8.99	102.64 %	-1225.49	-888.78	27.48 %
	100 km h ⁻¹	-336.54	31.59	109.39 %	-1499.05	-1084.26	27.67 %
	120 km h ⁻¹	-217.55	82.32	137.84 %	-2147.11	-1586.81	26.10 %

Fuente: Los Autores

4.7.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 SIN MODIFICACIONES

La influencia de las llantas en el modelo 2, se reporta en esta sección a través de un análisis de las fuerzas aerodinámicas que se generan en el modelo se visualiza con gráficas de presión y vorticidad. El objetivo es entender su comportamiento a lo largo del tiempo de simulación.

En la figura 4.67, muestra el comportamiento del modelo 2 sin modificaciones donde el coeficiente de dragado sufre un cambio al llegar a ser estable luego de un lapso de 10 [s] hasta 20 [s] empieza a subir su valor. Esto se debe a zonas de alta presión en la parte frontal del autobús, y para las tres velocidades este cambia.

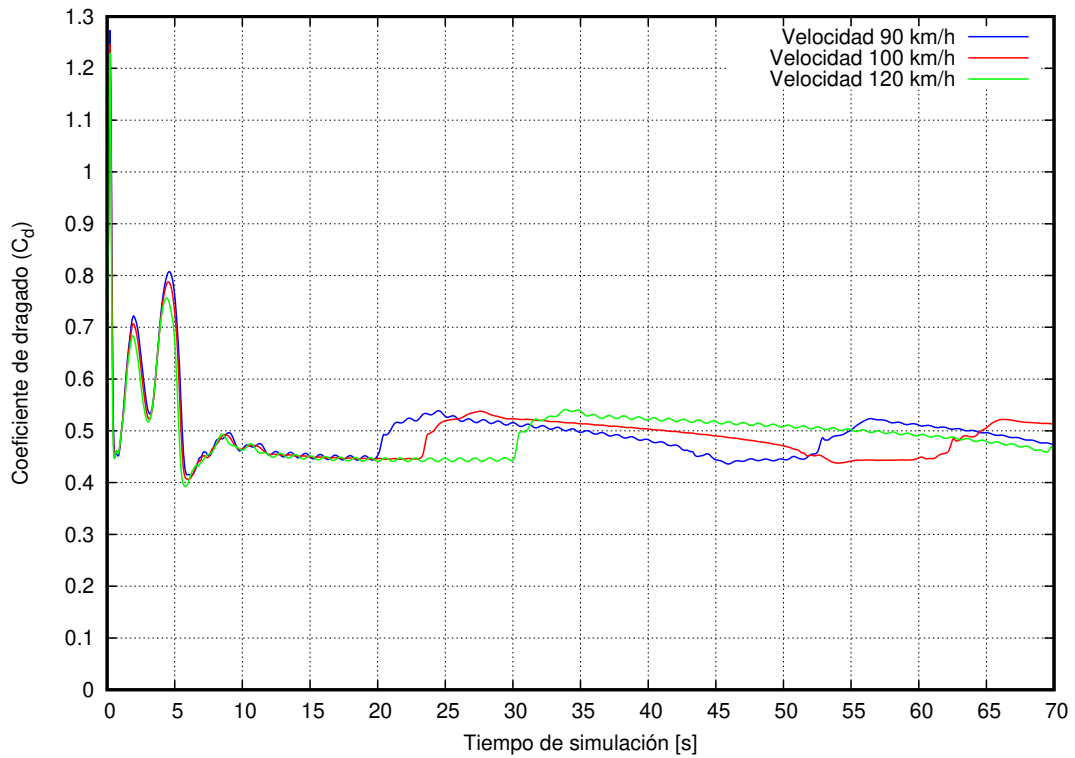


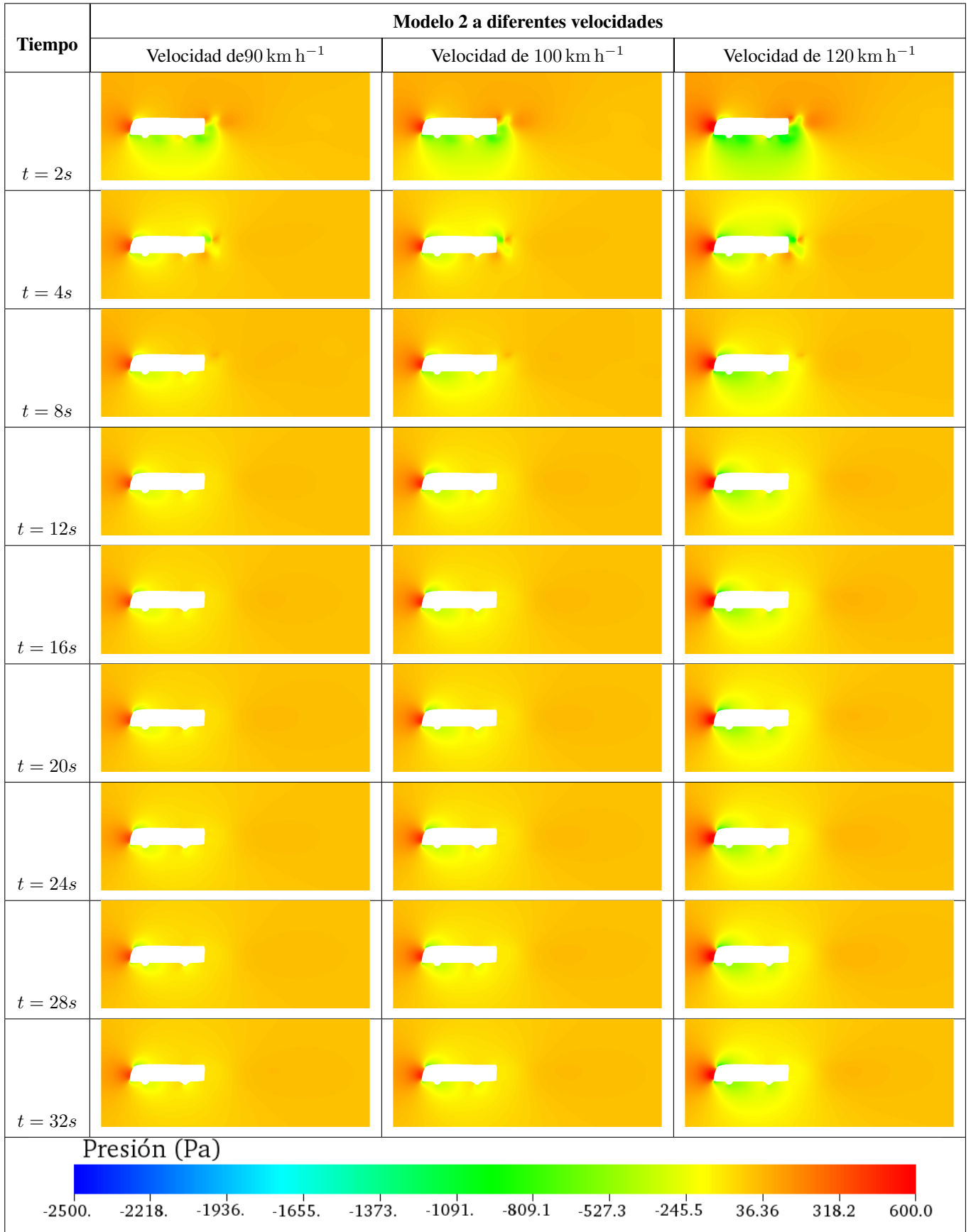
Figura 4.67: Coeficiente de dragado (C_d) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

A continuación, en la tabla 4.60, las gráficas de presión muestran las zonas de alta presión y baja presión que se forman alrededor de la geometría del autobús; en la parte frontal y superior es donde se presentan las zonas alta presión, mientras en la parte posterior e inferior las zonas de baja presión crean gradientes favorables y adversos alrededor del modelo en estudio.

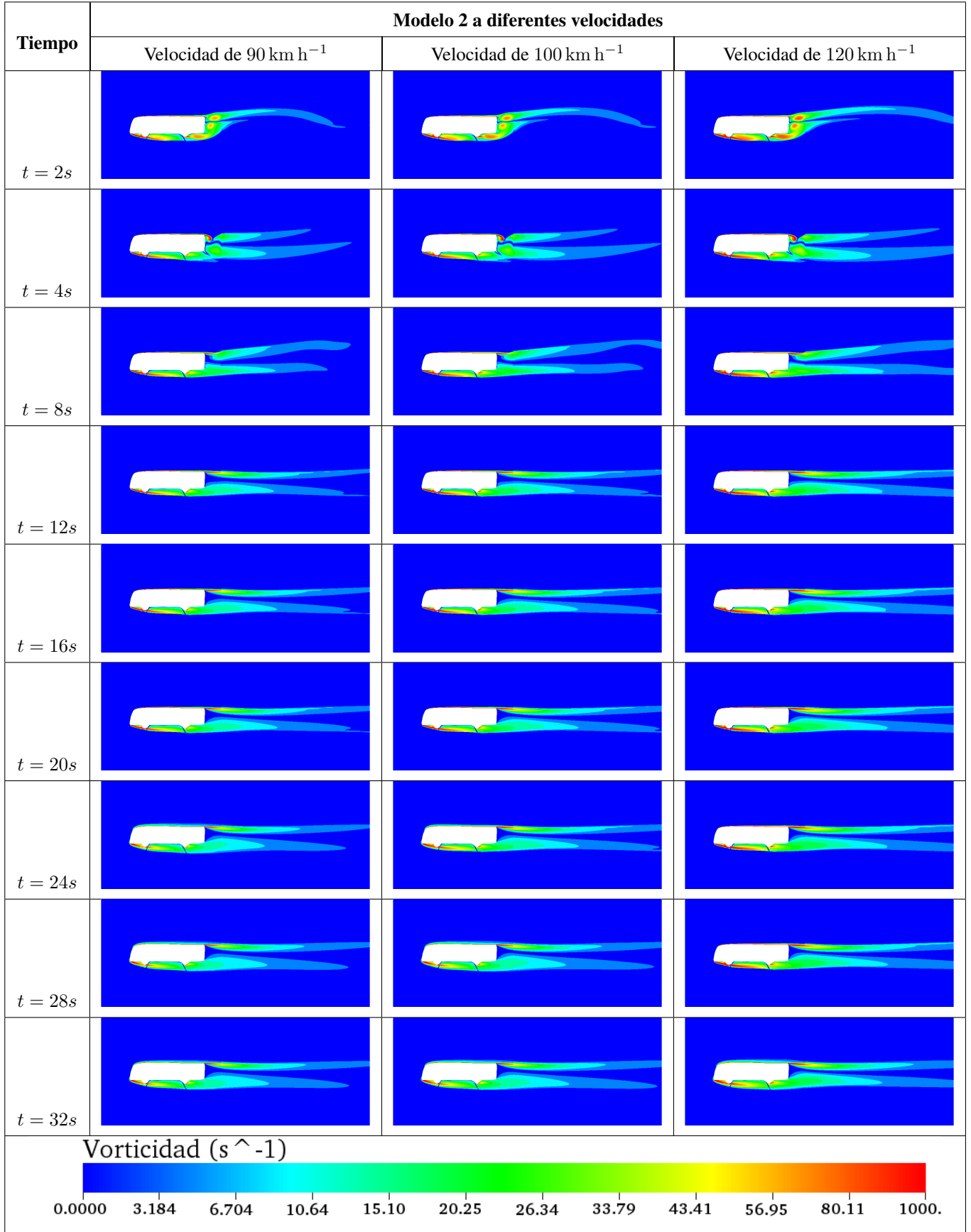
De la misma forma en la tabla 4.61, muestra el comportamiento que tiene la variable de vorticidad a diferentes tiempos.

Tabla 4.60: Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades sin modificación con llantas



Fuente: Los Autores

Tabla 4.61: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades sin modificación con llantas



Fuente: Los Autores

En la figura 4.68, muestra el comportamiento de la fuerza de dragado a lo largo del tiempo y las curvas formadas a diferentes velocidades, la de 120 km h^{-1} presenta mayor magnitud en el tiempo de simulación.

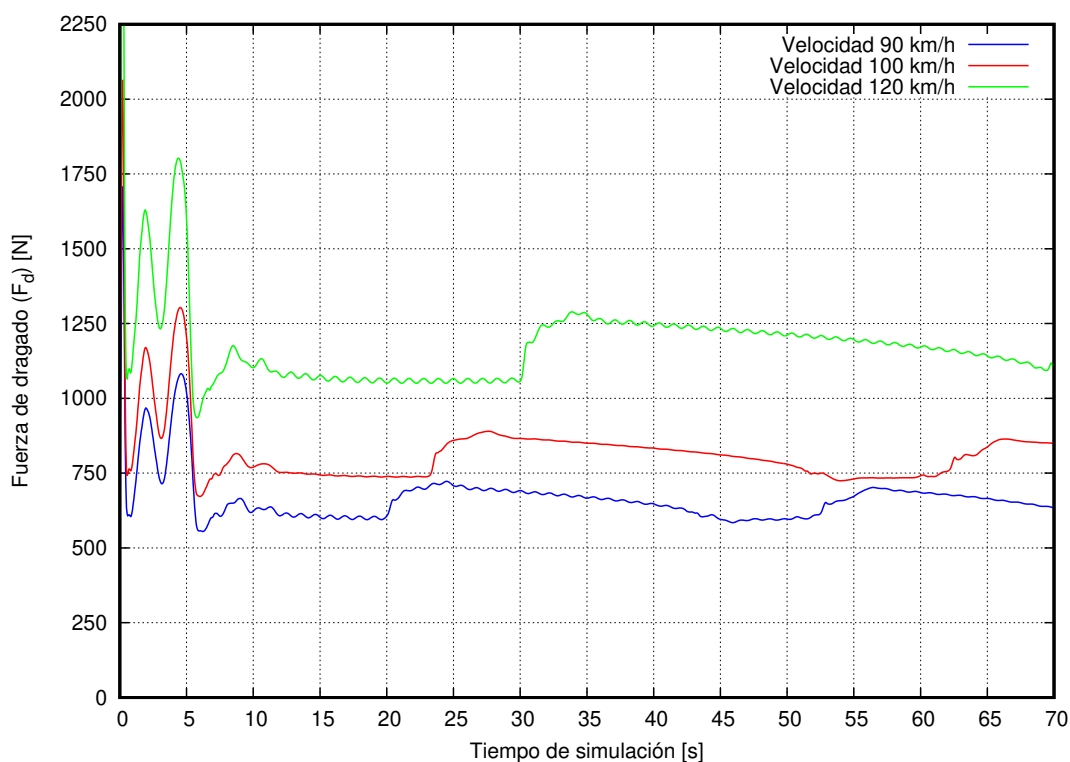


Figura 4.68: Fuerza de dragado (F_d) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.62: Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M2 con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 2	Diferencia porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de dragado	90 km h^{-1}	0,4859	0,00 %	$\sigma = 0,0277$
	100 km h^{-1}	0,4864	0,10 %	$\sigma = 0,0310$
	120 km h^{-1}	0,4870	0,23 %	$\sigma = 0,0314$
Fuerza de dragado	90 km h^{-1}	651,49[N]	0,00 %	$\sigma = 37,19 [N]$
	100 km h^{-1}	805,05[N]	23,57 %	$\sigma = 51,27 [N]$
	120 km h^{-1}	1157,83[N]	77,72 %	$\sigma = 74,83 [N]$

Fuente: Los Autores

En la tabla 4.62, muestra el valor del coeficiente y fuerza de dragado para el modelo 2 sin modificaciones, donde para vencer la resistencia que tiene el aire a 120 km h^{-1} es mayor, entendiéndose así que se necesita mayor energía para separar las moléculas del aire que mantienen contacto con el área frontal del autobús. Cabe mencionar que los valores del resultados tienen una baja dispersión.

A continuación, en las figuras 4.69 y 4.70, muestran el comportamiento del coeficiente y fuerza de sustentación respectivamente, denotando principalmente que el valor está por debajo de cero, permitiendo tener una fuerza en sentido contrario al peso del autobús.

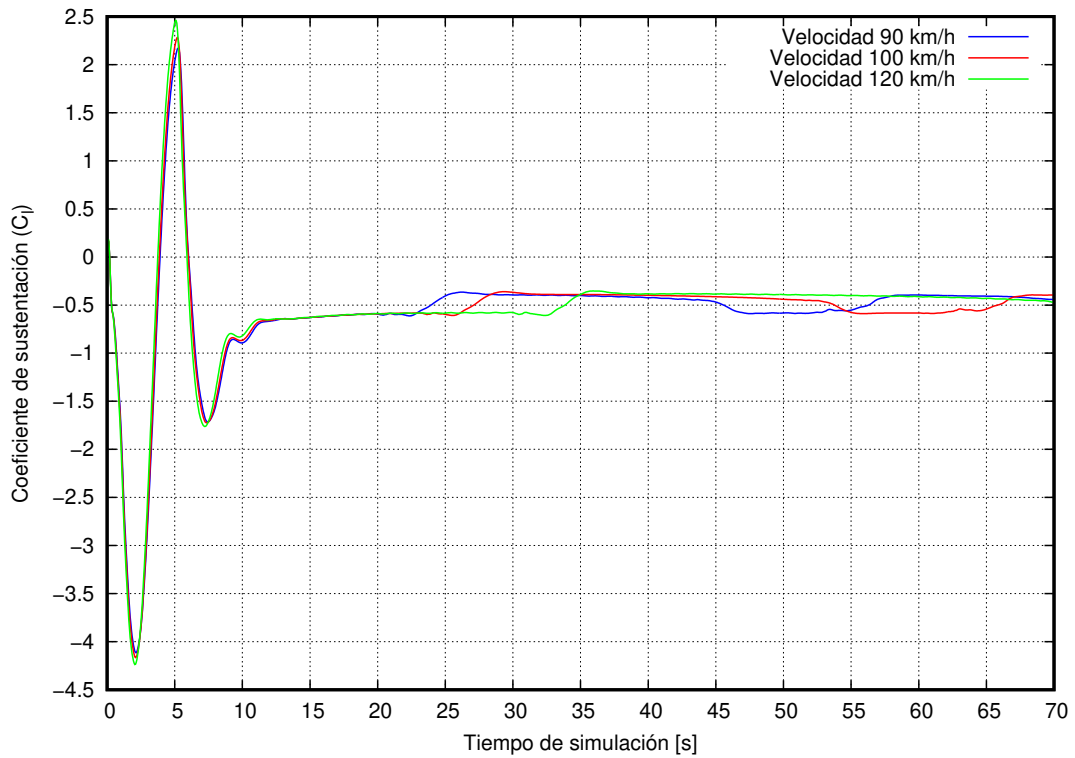


Figura 4.69: Coeficiente de sustentación (C_L) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

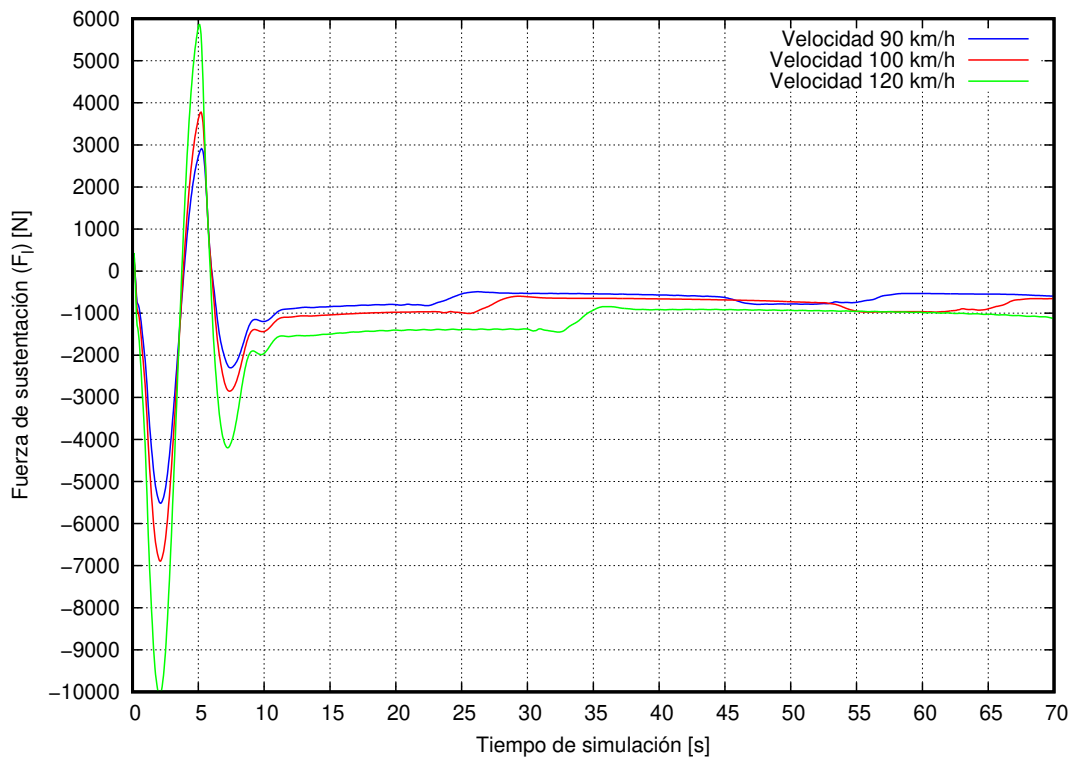


Figura 4.70: Fuerza de sustentación (F_L) de M2 a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.63: Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M2 con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 2	Diferencia porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de sustentación	90 km h ⁻¹	-0,4720	0,00 %	$\sigma = 0,0809$
	100 km h ⁻¹	-0,4679	0,86 %	$\sigma = 0,0879$
	120 km h ⁻¹	-0,4589	2,77 %	$\sigma = 0,0874$
Fuerza de sustentación	90 km h ⁻¹	-632,70[N]	0,00 %	$\sigma = 108,48 [N]$
	100 km h ⁻¹	-791,03[N]	25,02 %	$\sigma = 145,55 [N]$
	120 km h ⁻¹	-1117,26[N]	76,58 %	$\sigma = 208,35 [N]$

Fuente: Los Autores

El cambio de presión alta y baja en la parte inferior del autobús hacen que cuando se incrementa la velocidad del flujo esta se incrementa permitiendo que el desprendimiento de vórtices en la parte posterior disminuya a este fenómeno se la denomina rarefacción esto significa que se crea un área de succión con baja densidad de aire.

4.7.5. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DEL MODELO 2 CON MODIFICACIONES

El comportamiento aerodinámico para los modelos anteriores han sufrido un cambio en el comportamiento aerodinámico durante el tiempo de simulación, dichas variaciones han sido significativas al comparar el modelo 2 con y sin modificaciones en su geometría, es por ello, el siguiente análisis pertenece al modelo 2 con modificaciones considerando las llantas en la parte inferior del autobús para interpretar los resultados que se puedan dar en este modelo a diferentes velocidades.

Las gráficas de presión (tabla 4.64) y vorticidad (tabla 4.65), muestran la evolución de la geometría del modelo a lo largo del tiempo de simulación, es así, en cuanto al perfil de la presión en un inicio poseen zonas de alta presión en la parte frontal del autobús y zonas de baja presión en la parte posterior, creando gradientes adversos alrededor del modelo pues en un inicio existen desprendimientos de vórtices sobre la capa límite.

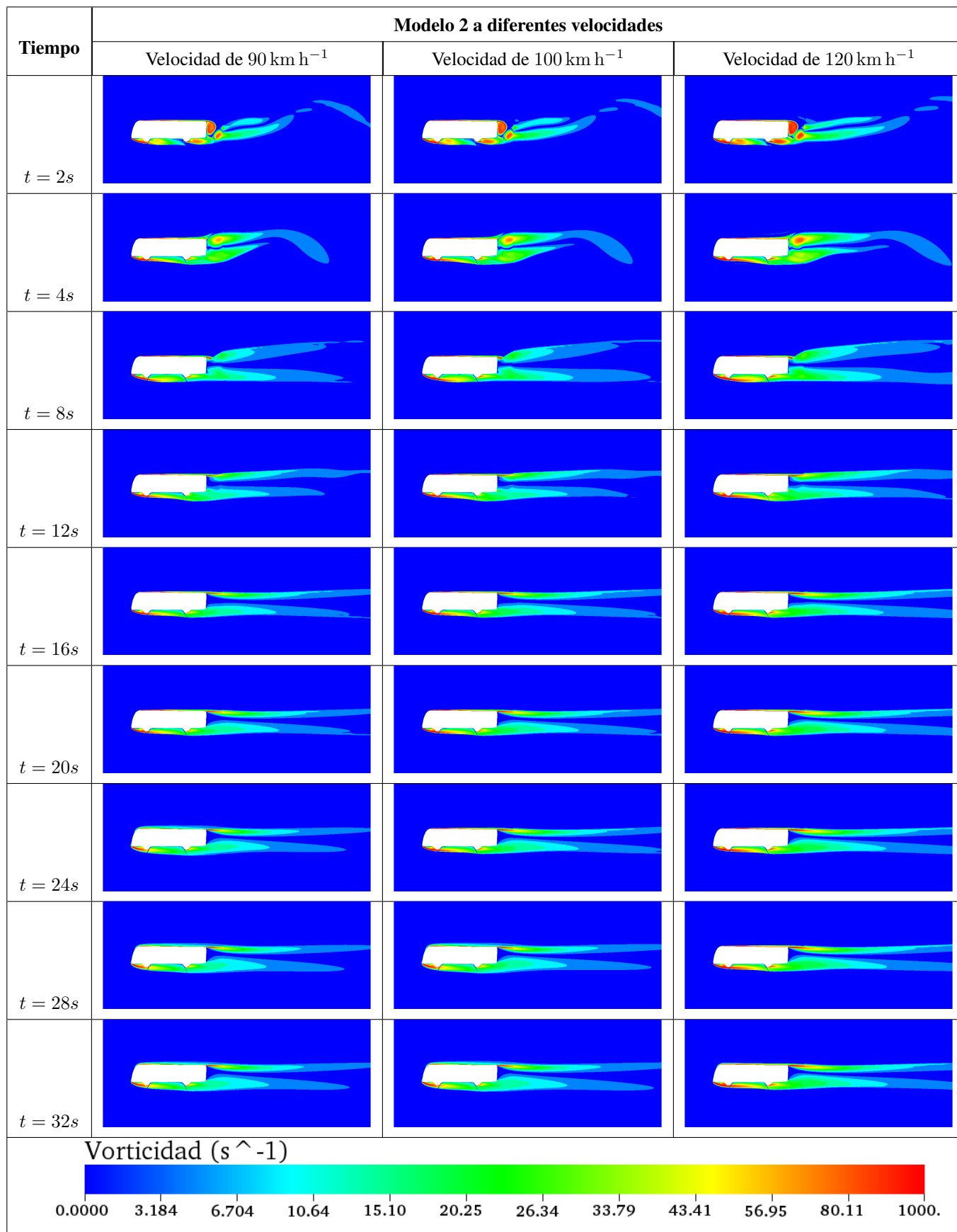
Para cuando la simulación se estabiliza la presencia de desprendimientos de vórtices se hacen cada vez menos visibles, pues el flujo que rodea tanto por la parte superior e inferior del modelo no tienen contacto, sino que mantienen cierta laminaridad entre ellos, formando así una zona de vacío conocido como estela que es más grande en la longitud a mayor velocidad.

Tabla 4.64: Presión a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificación y llantas



Fuente: Los Autores

Tabla 4.65: Vorticidad a diferentes tiempos de modelo estudio 2 a diferentes velocidades con modificación y llantas



Fuente: Los Autores

A continuación, en las figuras 4.71 y 4.72, presentan el comportamiento de estos parámetros a lo largo de las simulaciones permitiendo entender donde hay incrementos y disminución de dichos valores a diferentes velocidades.

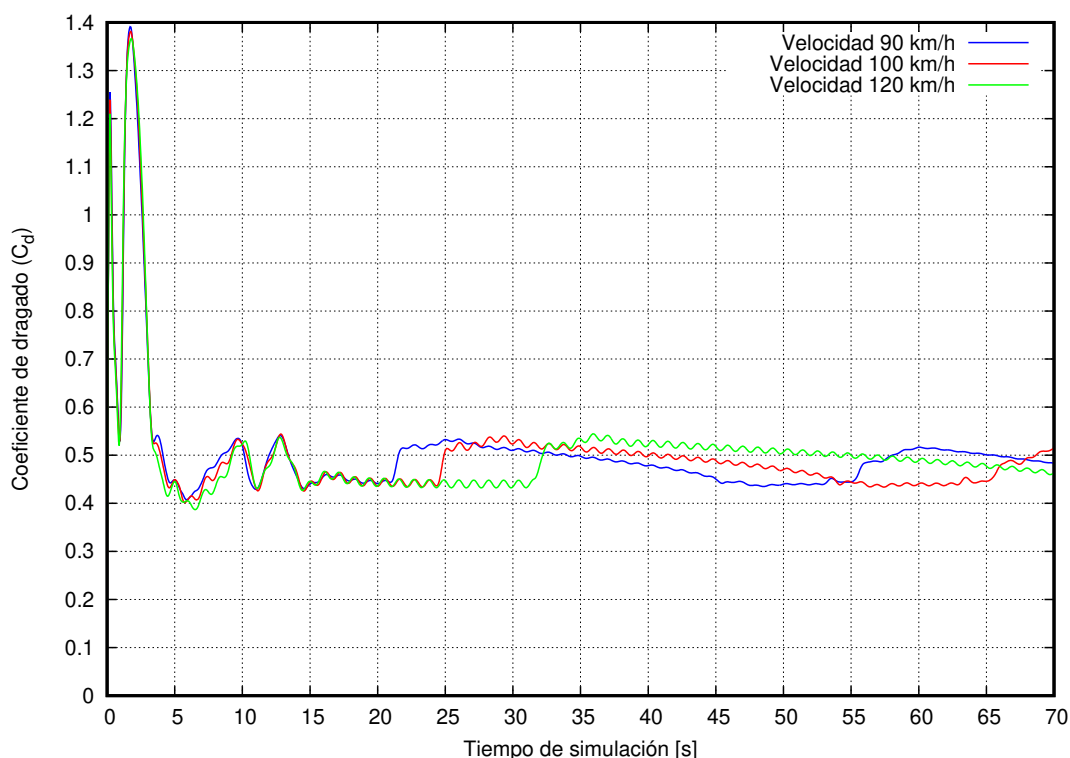


Figura 4.71: Coeficiente de dragado (C_d) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.66: Comparación de coeficiente y fuerza de dragado para M2 modificado con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 2	Diferencia porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de dragado	90 km h^{-1}	0,4765	0,00 %	$\sigma = 0,0284$
	100 km h^{-1}	0,4793	0,57 %	$\sigma = 0,0318$
	120 km h^{-1}	0,4825	1,26 %	$\sigma = 0,0323$
Fuerza de dragado	90 km h^{-1}	645,63[N]	0,00 %	$\sigma = 38,13 \text{ [N]}$
	100 km h^{-1}	794,11[N]	23,00 %	$\sigma = 52,57 \text{ [N]}$
	120 km h^{-1}	1149[N]	78,08 %	$\sigma = 77,05 \text{ [N]}$

Fuente: Los Autores

En tabla 4.66, muestra los valores promedio del coeficiente y fuerza de dragado para el modelo 2, donde el incremento de la energía necesaria para vencer la resistencia del aire se incrementa con la velocidad, aunque mantiene una dispersión de resultados baja con relación al valor medio.

La fuerza de dragado y el coeficiente de dragado mantienen la tendencia del crecimiento en su valor pues en ambos casos el mayor valor es para cuando la velocidad es 120 km h^{-1} .

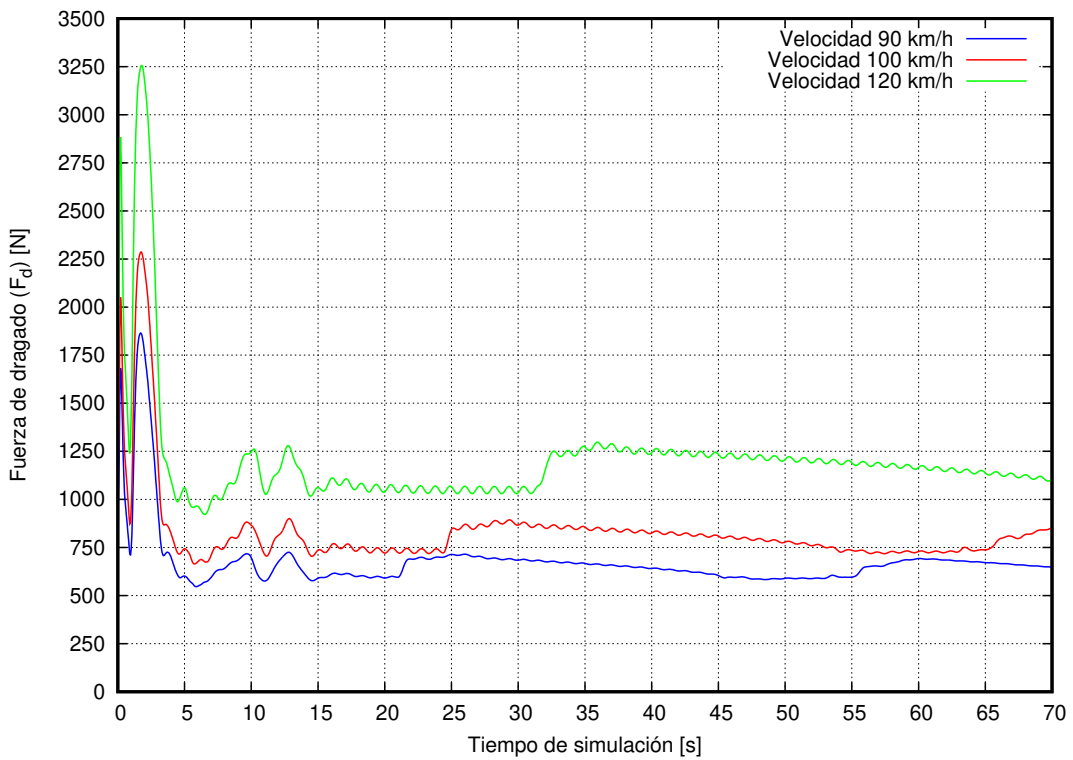


Figura 4.72: Fuerza de dragado (F_d) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

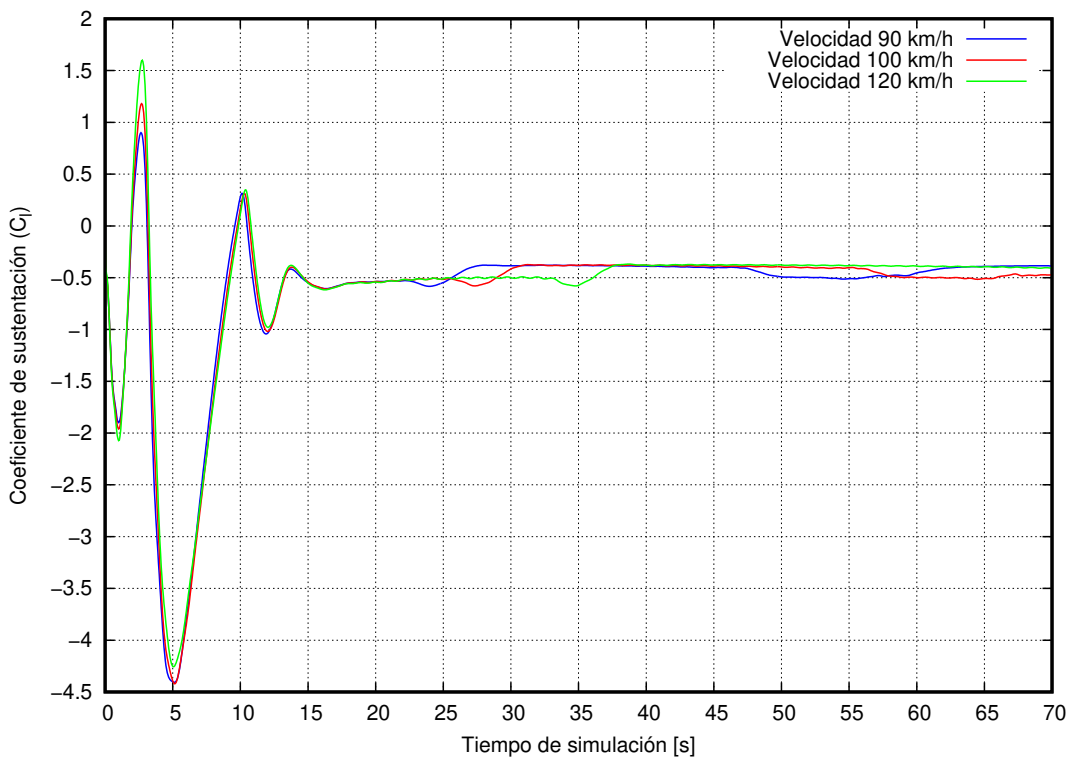


Figura 4.73: Coeficiente de sustentación (C_l) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Las figuras 4.73 y 4.74, muestran el comportamiento del coeficiente y fuerza de sustentación del modelo en estudio a diferentes velocidades, donde se puede observar que su valor esta por debajo de cero, es decir, la fuerza de sustentación tiene el mismo sentido al peso del autobús, haciendo que el contacto entre las llantas y el suelo mayor.

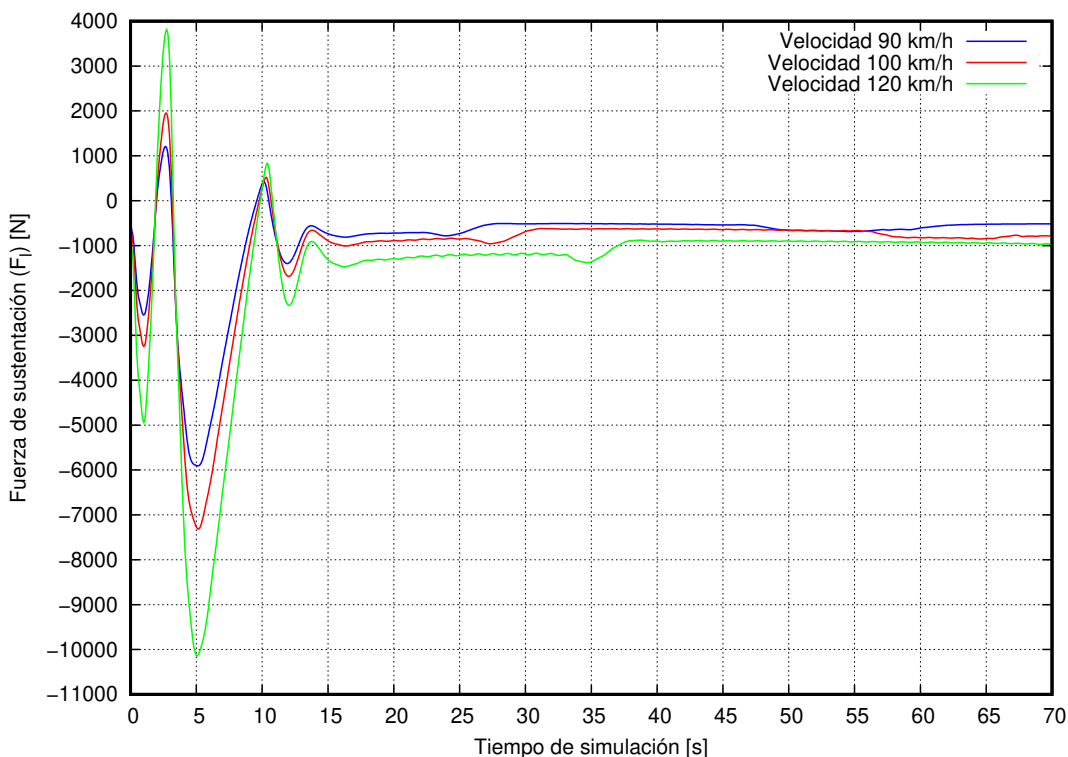


Figura 4.74: Fuerza de sustentación (F_1) de M2 modificado a diferentes velocidades, (azul) Velocidad de 90 km h^{-1} , (rojo) Velocidad 100 km h^{-1} y (verde) Velocidad de 120 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Tabla 4.67: Comparación de coeficiente y fuerza de sustentación para M2 modificado con llantas a diferentes velocidades.

Variable	Velocidad	Modelo 2	Diferencia porcentual	Desviación estándar
Coeficiente de sustentación	90 km h^{-1}	-0,4534	0,00 %	$\sigma = 0,0665$
	100 km h^{-1}	-0,4442	2,03 %	$\sigma = 0,0669$
	120 km h^{-1}	-0,4339	2,98 %	$\sigma = 0,0711$
Fuerza de sustentación	90 km h^{-1}	-593,08[N]	0,00 %	$\sigma = 89,17 [N]$
	100 km h^{-1}	-746,03[N]	25,79 %	$\sigma = 110,76 [N]$
	120 km h^{-1}	-1048,10[N]	76,72 %	$\sigma = 169,45 [N]$

Fuente: Los Autores

La fuerza de sustentación tiene un valor negativo indicando que la dirección de la fuerza esta hacia abajo siendo la mayor de $1048,10 [N]$ para una velocidad de 120 km h^{-1} teniendo un incremento de $76,72 \%$ con respecto a la velocidad de 90 km h^{-1} , además el comportamiento del C_1 disminuye al aumentar la velocidad del fluido, esto se puede deber a las zonas de baja presión en la parte inferior del modelo.

4.7.6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE MODELO 2 CON Y SIN MODIFICACIONES, CON Y SIN LLANTAS

Una vez terminado el análisis numérico del modelo 2 con los casos establecidos, contrastando el comportamiento aerodinámico entre ellos a diferentes velocidades.

La figura 4.77 y 4.78 describen el comportamiento del coeficiente de dragado y del coeficiente de sustentación del modelo 2 original con y sin llantas a la velocidad de 90 km h^{-1} .

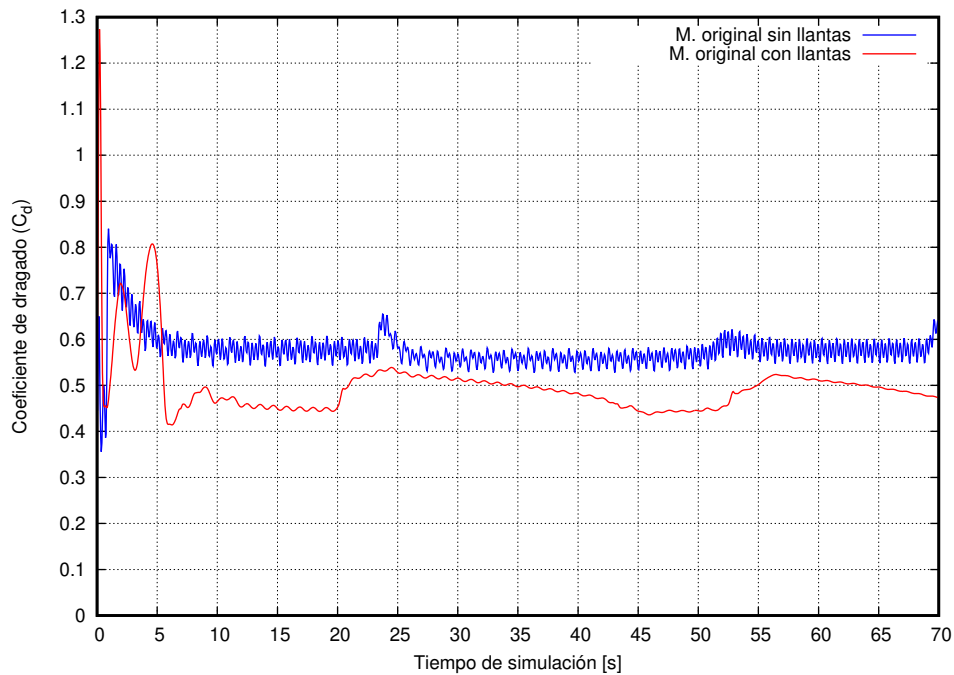


Figura 4.75: Contraste del (C_d) de M2 sin modificaciones, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

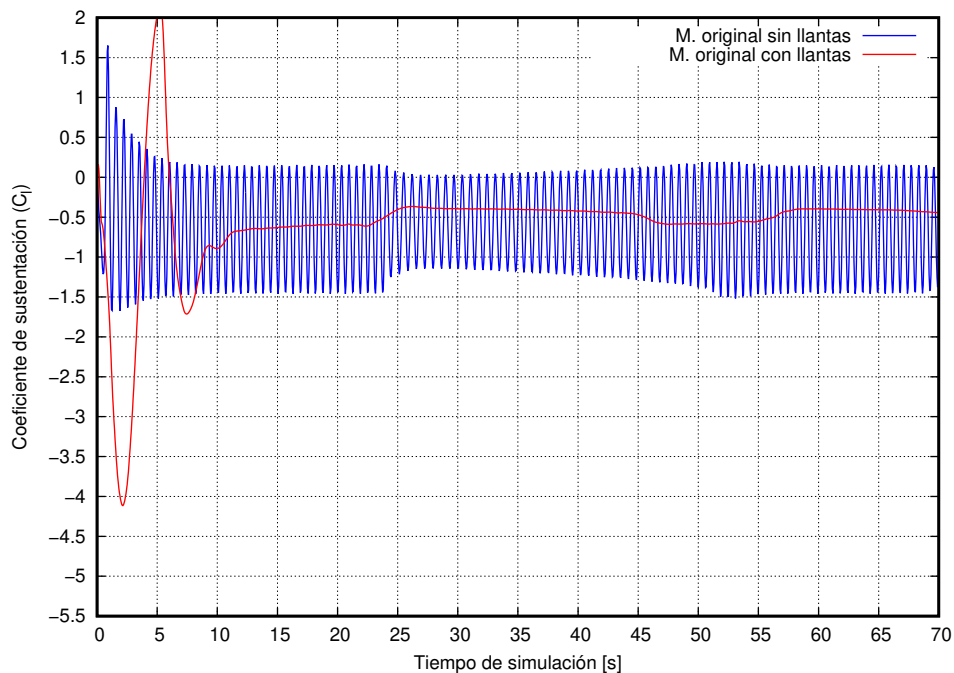


Figura 4.76: Contraste del (C_l) de M2 sin modificaciones, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

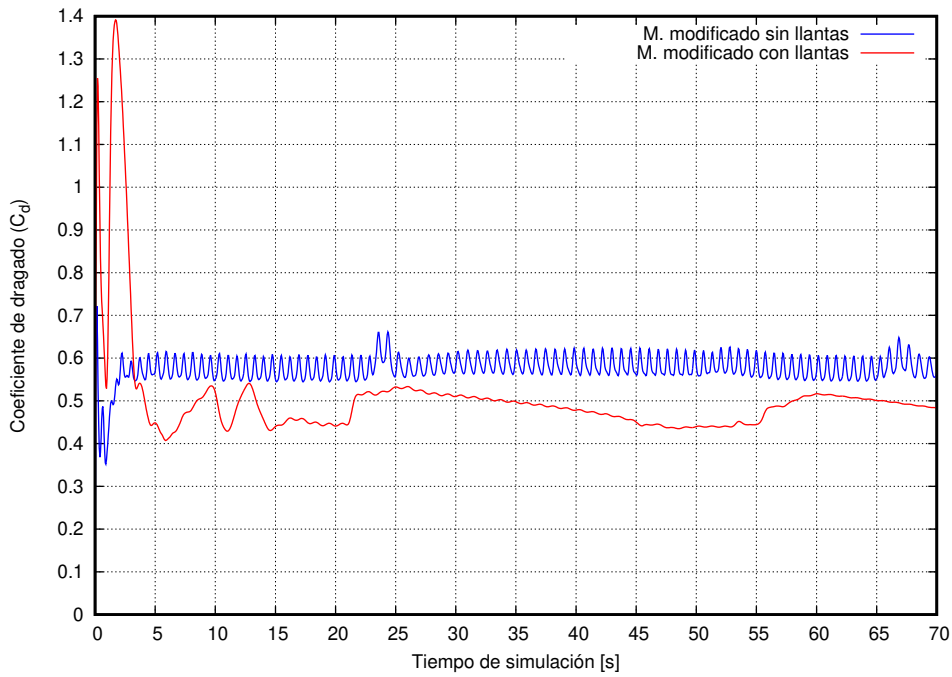


Figura 4.77: Contraste del (C_d) de M2 modificado, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

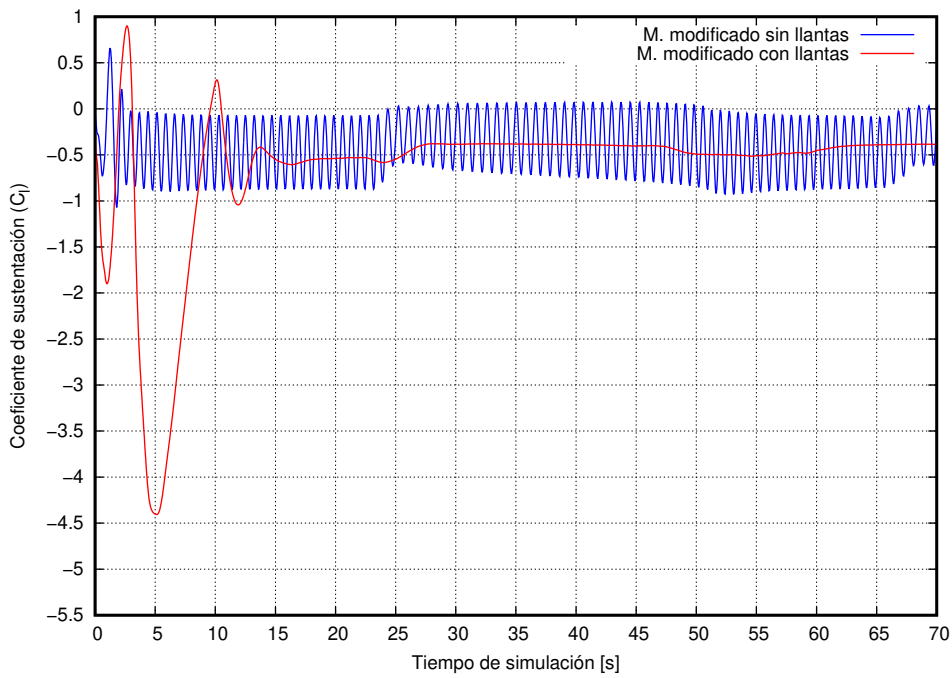


Figura 4.78: Contraste del (C_l) de M2 modificado, con y sin llantas a la velocidad 90 km h^{-1} .

Fuente: Los Autores

Los resultados para el modelo 2, se muestran en la tabla 4.68, y al comparar entre los modelos sin modificaciones considerando un análisis sin llantas y otro con llantas se observa que en el coeficiente de dragado tiene una disminución en el modelo con llantas, lo que se concluye que las llantas si son indispensables para éste estudio es decir, el uso de llantas ayuda a disminuir la energía necesaria para vencer la resistencia que genera el aire sobre el área frontal, sin embargo, para el coeficiente y fuerza sustentación las llantas crean zonas de baja presión creando una disminución en la fuerza ejercida sobre el área inferior del autobús, haciendo disminuir su valor en 20 % aproximadamente con respecto al generado sin llantas.

Mientras al compara el modelo 2 modificado con y sin llantas, los resultados tienen otro comportamiento, pues de forma general la disminución entre estos análisis tanto para el coeficiente y fuerza de dragado baja en porcentajes de 17 % para una velocidad de 90 km h^{-1} , un 19 % para la velocidad de 100 km h^{-1} , y un 21 % para la velocidad de 120 km h^{-1} , es decir, el modelo modificado con llantas ayuda a necesitar menor fuerza de avance para vencer la resistencia del aire.

Tabla 4.68: Comparación de parámetros aerodinámicos para M2 con y sin modificaciones, con y sin llantas a diferentes velocidades.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS							
Variable	Velocidad	Modelo 2 sin modificaciones		Diferencia porcentual	Modelo 2 con modificaciones		Diferencia porcentual
		M2 sin llantas	M2 con llantas		M2 sin llantas	M2 con llantas	
Coeficiente de dragado	90 km h^{-1}	0.5712	0.4859	14.93 %	0.5800	0.4765	17.84 %
	100 km h^{-1}	0.5733	0.4864	15.16 %	0.5934	0.4793	19.23 %
	120 km h^{-1}	0.5771	0.4870	15.61 %	0.6110	0.4825	21.02 %
Fuerza de dragado [N]	90 km h^{-1}	757.38	651.49	13.98 %	777.53	645.63	16.96 %
	100 km h^{-1}	938.54	805.05	14.22 %	982.32	794.11	19.16 %
	120 km h^{-1}	1360.02	1157.83	14.87 %	1445.94	1149.81	21.03 %
Coeficiente de sustentación	90 km h^{-1}	-0.6031	-0.4720	21.74 %	-0.3892	-0.4534	16.49 %
	100 km h^{-1}	-0.5994	-0.4679	21.94 %	-0.3979	-0.4442	11.63 %
	120 km h^{-1}	-0.5814	-0.4589	21.07 %	-0.3634	-0.4399	21.04 %
Fuerza de sustentación [N]	90 km h^{-1}	-799.60	-632.70	20.87 %	-521.73	-593.08	13.68 %
	100 km h^{-1}	-981.33	-791.03	19.39 %	-658.73	-746.03	13.25 %
	120 km h^{-1}	-1370.10	-1117.26	18.45 %	-865.98	-1048.10	21.03 %

Fuente: Los Autores

4.8. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

4.8.1. RESISTENCIA AERODINÁMICA

La fuerza de resistencia aerodinámica es una fuerza que se opone al avance de una partícula, como se explica en el Capítulo II, y su valor es evaluado mediante la ecuación (2.39)

4.8.2. RESISTENCIA A LA RODADURA

La resistencia a la rodadura es una fuerza que se resiste al movimiento del autobús cuando este se mueve, mientras está en movimiento depende de la temperatura, presión del aire, etc.

$$F_R = KW_g \quad (4.1)$$

Donde:

K = Coeficiente de resistencia al rodamiento. (Anexo 7.3)

W = Peso bruto vehicular. [kg] (Anexo 7.4)

g = Aceleración de la gravedad. [$m s^{-2}$]

4.8.3. RESISTENCIA POR PENDIENTE

$$F_G = W g \text{ Sen}\alpha \quad (4.2)$$

Donde:

α = Ángulo entre la pendiente y el plano horizontal. Si este valor es cero, la fuerza en la pendiente es cero.

W = Peso bruto vehicular. [kg]

g = Aceleración de la gravedad. [$m s^{-2}$]

4.8.4. POTENCIA DEL MOTOR

Para poder determinar la potencia que se requiere en el motor, está relacionada con los datos anteriores como la resistencia aerodinámica, resistencia a la rodadura, la resistencia por pendiente, así como otras pérdidas de potencia por equipo como se muestra en la ecuación 4.3.

$$P_T = (F_A + F_R + F_G)V + P_E \quad (4.3)$$

Los siguientes supuestos se realizan para el cálculo de potencia.

Donde:

P_E = Pérdidas de potencia por equipos. $P_E = 6KW$

4.8.5. CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Para el procedimiento del cálculo exacto del consumo de combustible se realiza una estimación del mismo. Una vez determinada la potencia, se busca un motor disponible en el mercado y se obtienen los datos de torque y consumo específico de combustible y a cuantas rpm (revoluciones por minuto) alcanza dicha potencia, por ejemplo: Para un chasis Mercedes-Benz of 1724.

Con el consumo de combustible y con la potencia del motor se procede al cálculo del gasto de combustible.

$$C_{cd} = \text{Consumo } P_T \frac{1}{\rho_{\text{diesel}}} \quad (4.4)$$

Donde:

C_{cd} = Consumo de combustible en base al C_d . [$lt h^{-1}$]

Consumo = Consumo de combustible . [$\frac{g}{kWh}$]

P_T = Potencia total. [kW]

$\rho_{\text{diésel}}$ = Densidad del diésel . [835 kg m⁻³]

Tabla 4.69: Datos Técnicos del Chasis OF 1724/59

Especificaciones Técnicas		
Potencia Máxima	175 kW (234.5 HP)	2200 rpm
Par Motor Máximo	850 Nm	1400 rpm
Consumo Específico	194 g / kWh	1400 rpm

Fuente: Los Autores

4.8.6. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

En este apartado es importante realizar la comparación del gasto de combustible en base al coeficiente de dragado (valor teórico) y los valores aproximados según la opinión de los transportistas de autobuses interprovinciales (valor real).

En base a las entrevistas con los dueños de los autobuses se estimó el consumo de combustible en un viaje Ambato-Quito-Ambato, el valor de 24 dólares en combustible diésel, para lo cual se realiza el respectivo cálculo a este dato se lo denominará gasto 1.

Datos:

Consumo (\$) = 24.00 Dólares (ida y vuelta)

Distancia (km) = [123 km]

Costo del diésel = [1,03 \$ gl⁻¹]

Velocidad permitida = [90 km h⁻¹]

$$\text{Gasto 1} = 24 \$ \frac{1 \text{ gl}}{1,03 \$} \frac{90 \text{ km}}{\text{h}} \frac{1}{2(123) \text{ km}}$$

$$\text{Gasto 1} = 8,525 \text{ gl h}^{-1}$$

Según el último observatorio de costes del transporte de viajeros en Autocar del Ministerio de Fomento, un autocar de 55 plazas consume alrededor de 35 litros por cada 100 kilómetro, solo en combustible, publicado por Tom Tom Telematics el 3 de Julio de 2017, a esto dato se lo denominará gasto 2.

$$\text{Gasto 2} = 0,35 \frac{\text{lt}}{\text{km}} \frac{1 \text{ gl}}{3,7854 \text{ lt}} \frac{90 \text{ km}}{\text{h}}$$

$$\text{Gasto 2} = 8,321 \text{ gl h}^{-1}$$

Una vez detallado el proceso de cálculo y estimación del consumo de combustible para los modelos en estudio se procede a elaboración de una tabla para la comparación entre lo obtenido mediante la simulación numérica y los datos obtenidos por medio de los señores transportistas de servicio público.

4.8.7. TABLA RESUMEN DE LOS CONSUMOS DE COMBUSTIBLE

En la tabla 4.70, se muestran los resultados de todos casos de estudio las cuales se puede verificar el coeficiente de dragado C_d reportado de las simulaciones y tomado el promedio.

De izquierda a derecha, en la columna 1, se encuentran los dos modelos de estudio analizado; en la columna 2, la velocidad a la que fueron analizados los modelos; en la columna 3, el coeficiente de dragado calculado en la solución numérica; en la columna 4, la potencia del motor necesaria para moverse con respecto al valor C_d ; en la columna 5 está el cálculo estimado de consumo de combustible de cada modelo expresado en $lt\ h^{-1}$ y $gl\ h^{-1}$; en la columna 6 está el gasto 1, calculado en base a información obtenida de los dueños de autobuses ($gl\ h^{-1}$); en la columna 7 la diferencia porcentual entre el consumo estimado por el C_d y el gasto 1; en la columna 8 está el gasto 2 calculado con la velocidad de movimiento y un consumo reportado por el Ministerio de Fomento que es de $0,35\ lt\ km^{-1}$; en la última columna está la diferencia porcentual denominada error 2 entre el gasto 2 y el consumo estimado con el C_d para poder ver cuanto varía entre ellos.

A continuación, se detalla como se realizaron los cálculos presentados en la tabla, es decir, con los datos anteriores y con la fórmula 4.3, se calcula la potencia del motor expresada en KW y HP para mejor interpretación. Con la fórmula 4.4, podemos estimar el consumo de combustible en base al C_d (C_{cd}).

El gasto 1 y gasto 2, nos sirven para comparar con el consumo en base al C_d , con los que datos obtenidos por información propia de los conductores, y el gasto 2 por la literatura, con lo que se saca el porcentaje de variación de una con respecto a otra. Para el primer caso del modelo 1 a $90\ km\ h^{-1}$ el consumo con el C_d es $8,8\ gl\ h^{-1}$ con el gasto 1 un valor de $8,52\ gl\ h^{-1}$ dando un porcentaje de $3,15\ %$ de variación y para el gasto 2 con un consumo de $8,32\ gl\ h^{-1}$ dando un porcentaje de variación de $5,46\ %$.

Tabla 4.70: Resumen de los consumos de combustible para los diferentes casos estudiados

CÁLCULO DEL GASTO DE COMBUSTIBLE										
Modelos	Velocidad	C_d	Potencia		Ccd		Gasto 1	Error 1	Gasto 2	Error 2
		adimen.	KW	HP	lt h ⁻¹	gl h ⁻¹	gl h ⁻¹	%	gl h ⁻¹	%
MODELOS GEOMÉTRICOS SIN CONSIDERAR MODELOS DE TURBULENCIA										
Modelo 1	90 km h ⁻¹	0.8645	143.42	192.18	33.32	8.80	8.52	3.15	8.32	5.46
	100 km h ⁻¹	0.9102	181.13	242.72	42.08	11.12	9.47	14.79	9.25	16.83
	120 km h ⁻¹	0.9520	275.08	368.60	63.90	16.88	11.37	32.67	11.10	34.27
Modelo 2	90 km h ⁻¹	0.8106	146.78	196.68	34.10	9.01	8.52	5.37	8.32	7.62
	100 km h ⁻¹	0.8382	184.16	246.77	42.79	11.30	9.47	16.21	9.25	18.21
	120 km h ⁻¹	0.8775	280.71	376.15	65.22	17.23	11.37	34.03	11.10	35.60
MODELOS GEOMÉTRICOS CONSIDERANDO MODELOS DE TURBULENCIA										
Modelo 1	90 km h ⁻¹	0.8852	145.03	194.34	33.7	8.90	8.52	4.24	8.32	6.53
	100 km h ⁻¹	0.9013	180.18	241.44	41.86	11.06	9.47	14.35	9.25	16.39
	120 km h ⁻¹	0.9627	277.05	371.24	64.27	16.98	11.37	33.05	11.10	34.65
Modelo 2	90 km h ⁻¹	0.5712	125.92	168.727	29.25	7.73	8.52	-10.32	8.32	-7.69
	100 km h ⁻¹	0.5733	152.49	204.33	35.43	9.36	9.47	-1.20	9.25	1.21
	120 km h ⁻¹	0.5771	218.68	293.03	50.81	13.42	11.37	15.32	11.10	17.34
MODELOS GEOMÉTRICOS MODIFICADOS CONSIDERANDO MODELOS DE TURBULENCIA										
Modelo 1	90 km h ⁻¹	0.6265	124.9	167.36	29.02	7.67	8.52	-11.20	8.32	-8.55
	100 km h ⁻¹	0.6352	151.77	203.37	35.26	9.31	9.47	-1.69	9.25	0.74
	120 km h ⁻¹	0.6453	218.51	292.81	50.77	13.41	11.37	15.25	11.10	17.27
Modelo 2	90 km h ⁻¹	0.5800	126.68	169.75	29.43	7.77	8.52	-9.65	8.32	-7.03
	100 km h ⁻¹	0.5934	154.89	207.55	35.99	9.51	9.47	0.37	9.25	2.75
	120 km h ⁻¹	0.6110	225.68	302.41	52.43	13.85	11.37	17.94	11.10	19.89
MODELOS GEOMÉTRICOS SIN MODIFICAR CON LLANTAS										
Modelo 1	90 km h ⁻¹	0.4338	109.9	147.27	25.53	6.74	8.52	-26.40	8.32	-23.38
	100 km h ⁻¹	0.4365	130.55	174.94	30.33	8.01	9.47	-18.22	9.25	-15.40
	120 km h ⁻¹	0.4367	180.05	241.26	41.83	11.05	11.37	-2.86	11.10	-0.41
Modelo 2	90 km h ⁻¹	0.4860	118.49	158.78	27.53	7.27	8.52	-17.22	8.32	-14.42
	100 km h ⁻¹	0.4864	142.10	190.41	33.01	8.72	9.47	-8.62	9.25	-6.03
	120 km h ⁻¹	0.4869	200.05	268.07	46.48	12.28	11.37	7.43	11.10	9.64
MODELOS GEOMÉTRICOS MODIFICADOS CON LLANTAS										
Modelo 1	90 km h ⁻¹	0.4869	114.03	152.8	26.49	7.00	8.52	-21.82	8.32	-18.91
	100 km h ⁻¹	0.4910	136.37	182.73	31.68	8.37	9.47	-13.18	9.25	-10.48
	120 km h ⁻¹	0.4928	190.39	255.12	44.23	11.68	11.37	2.72	11.10	5.04
Modelo 2	90 km h ⁻¹	0.4765	117.66	157.67	27.34	7.22	8.52	-18.03	8.32	-15.22
	100 km h ⁻¹	0.4793	141.25	189.27	32.82	8.67	9.47	-9.25	9.25	-6.64
	120 km h ⁻¹	0.4825	199.14	266.85	46.27	12.22	11.37	7.01	11.10	9.23

Fuente: Los Autores

4.9. CONSUMO COMPUTACIONAL

En el estudio el uso de las herramientas computacionales fue importante, y poder usar el máximo rendimiento de ellas permitió obtener soluciones más óptimas, pero debido al limitado acceso a los recursos computacionales se usaron equipos tecnológicos con las siguientes características:

Tabla 4.71: Resumen de recursos computacionales

CONSUMO COMPUTACIONAL		
	Máquina 1	Máquina 2
Equipo	Hp Pavilion Dm4	Toshiba Satellite C45-ASP43
Procesador	Intel CORE i5 @ 2,30 GHz	Intel CORE i5 @ 2,30 GHz
Número de CPU's	3	4
Memoria RAM	6 GB	6 GB
Tiempo por simulación	15 horas 30 min	13 horas 45 min
Tiempo total de procesamiento	12 días 22 horas	11 días 11 horas
Número de iteraciones	1500	1500
Tamaño archivo/iteración	22,45 MB	22,45 MB
Tamaño total del archivo	32,90 GB	32,90 GB

Fuente: Los Autores

La tabla 4.71 muestra la descripción de los equipos computacionales usado durante las simulación de cada uno de los equipos, cabe mencionar que el tamaño total por archivo corresponde a una sola simulación, para este estudio se realizaron 20 simulaciones con las mismas características para cada modelo de carrocería seleccionada.

El número de celdas usadas para todos los modelos fueron alrededor de 140000, y el tiempo que tarde en realizar las simulaciones depende de la complejidad de estudio, es decir, al añadir esquemas de turbulencia al análisis, tardó 4 horas más, aumentando el tamaño de almacenamiento en 30 % aproximadamente.

PARTE III: CONTRASTE DEL ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE LAS CARROCERÍAS DE AUTOBUSES

4.10. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO AERODINÁMICO DE LOS MODELOS DE ESTUDIO

El estudio experimental se realizó en el túnel de viento del Laboratorio de Metrología del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología INAMHI, el cual es un túnel de viento de ciclo cerrado, que alcanza velocidades máximas de alrededor de los 60 m s^{-1} las cuales alcanza al rango de nuestro estudio, que esta al rededor de los 25 m s^{-1} a $33,33 \text{ m s}^{-1}$. Las dimensiones internas de la cámara de viento o sección de trabajo son (500 x 1200) mm, y esta dotado de material acrílico con una ventana abatible para la observación de los ensayos y para poder realizar la ubicación y medición de los resultados.

4.10.1. PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN





4.10.1.1. PROTOTIPOS A ESCALA

Para validar la similitud de la geometría entre el modelo real y el prototipo se realizó la impresión en 3D de los modelos de autobuses con llantas en material plástico PLA a una escala de 1:60 para el modelo 1 y 1:65 para el modelo 2, dichas impresiones se realizó en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero del Honorable Consejo Provincial de Tungurahua.

Además, para el acabado en los modelos 3D fue con pintura en poliuretano que es usada para autobuses quedando una superficie similar al autobús real.

Para diferenciar los modelos se pintó con diferentes cortes de pintura a los modelos 1 (con y sin modificaciones) y con otro corte de pintura a los modelos 2 (con y sin modificaciones), como se puede observar en la tabla 4.72.

Tabla 4.72: Modelos de estudio a escala

MODELOS	PROTOTIPOS
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES	
MODELO 1 CON MODIFICACIONES	
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES	
MODELO 2 CON MODIFICACIONES	

Fuente: Los Autores

4.10.1.2. MONTAJE DE LOS MODELOS AL TÚNEL DE VIENTO

Para realizar el montaje de los modelos sujetos a realizar las pruebas se desarrolló un soporte metálico de varilla de 1/4 de espesor, con el objetivo de que sirva de base para poder sujetar a la pesa del túnel de viento, los modelos fueron ubicados a una distancia de 22,5 [cm] desde el nivel de la cámara de prueba hacia la base del autobús sin tomar en cuenta las llantas, así también a una medida de 23 cm desde el costado izquierdo de la cámara hacia el borde trasero del modelo. Todos los modelos debían estar sujetos, centrados y correctamente alineados y nivelados de tal forma que el flujo sea perpendicular a la cara frontal del bus, para dichas acciones se utilizó una hexagonal, un flexómetro, una escuadra, y el nivel respectivamente.

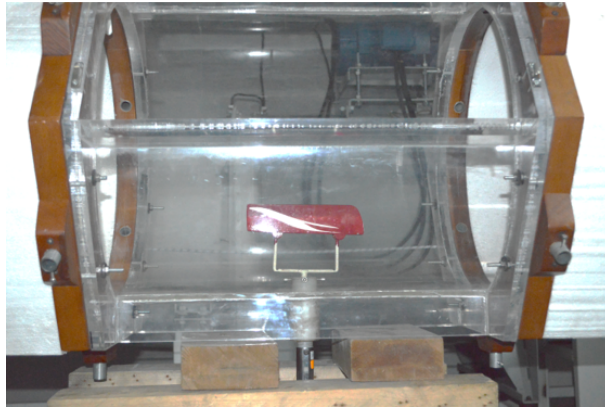


Figura 4.79: Montaje de los modelos en la cámara de prueba

Fuente: Los Autores

4.10.1.3. UBICACIÓN DE SENSORES

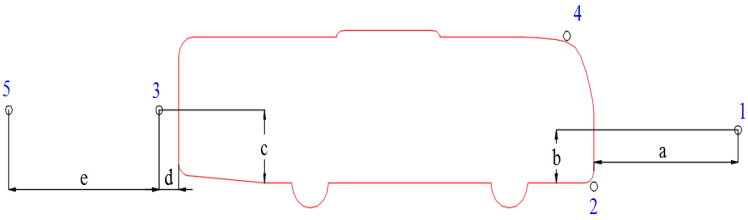
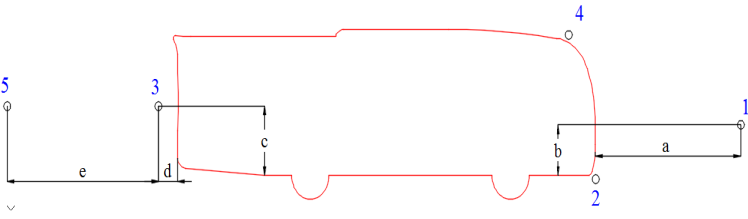
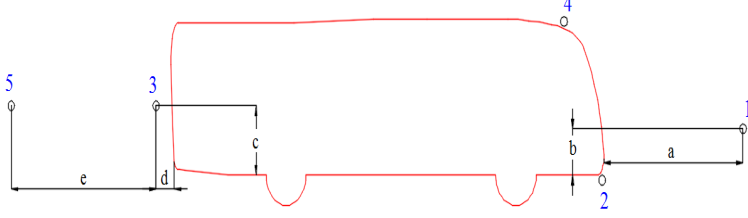
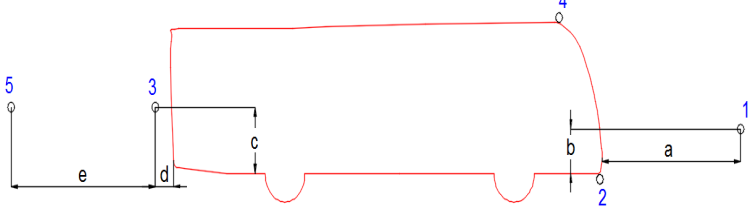
Para realizar la toma de datos de presión los sensores fueron ubicados en los 5 puntos que se muestra en las figuras de la tabla 4.73 acotados con letras minúsculas las cuales representan la distancia a la que se puso el sensor.

- El punto 1.- está ubicado adelante del bus con distancias de ($a = 20$ cm); ($b = 2,5$ cm).
- El punto 2.- está ubicado en la parte inferior frontal del modelo junto al perfil del modelo.
- El punto 3.- está ubicado en la parte posterior cerca del bus a una distancia de ($c = 2,5$ cm); ($d = 1,5$ cm).
- El punto 4.- está ubicado en la parte frontal superior junto en el perfil del autobús.
- El punto 5.- está ubicado en la parte posterior del bus ubicado en los puntos ($c = 2,5$ cm); ($e = 10$ cm).

Los puntos elegidos para la toma de datos fueron por los siguientes motivos:

Para el punto 1 con ayuda del tubo de pitot medir la presión que tendrá el túnel de viento antes de entrar en contacto con el autobús, la presión medida está con relación a la presión atmosférica. El punto 2 nos permite medir el cambio de presión cuando el flujo trata de rodear el autobús, así también por lo observado en las simulaciones donde en la parte inferior se observaron zonas de baja presión. El punto 3 permite medir las zonas de baja presión que ocurre cuando el aire trata de llenar cuando se produce la zona de vacío, fue un punto importante por lo observado en las simulaciones. Para el punto 4 al estar en la parte superior de autobús permite determinar la magnitud de la presión para identificar que ocurre cuando el flujo choca y sigue el perfil del autobús. Y por último el punto 5 servirá para poder diferenciar el cambio de presión que tiene entre la entrada de flujo con la salida de flujo de aire.

Tabla 4.73: Ubicación de los sensores para presión

MODELOS	PROTOTIPOS
<p>MODELO 1 SIN MODIFICACIONES</p>	
<p>MODELO 1 CON MODIFICACIONES</p>	
<p>MODELO 2 SIN MODIFICACIONES</p>	
<p>MODELO 2 CON MODIFICACIONES</p>	

Fuente: Los Autores

Para realizar la toma de datos de velocidad los sensores fueron ubicados en los 7 puntos que se muestra en las figuras de la tabla 4.74 acotados con letras minúsculas las cuales representan la distancia a la que se puso el sensor.

Punto 1.- está ubicado adelante del bus con distancias de ($a = 1,5 \text{ cm}$); ($c = 2,5 \text{ cm}$).

Punto 2.- está ubicado en la parte frontal del modelo en los puntos ($c = 2,5 \text{ cm}$) ($b = 25 \text{ cm}$) .

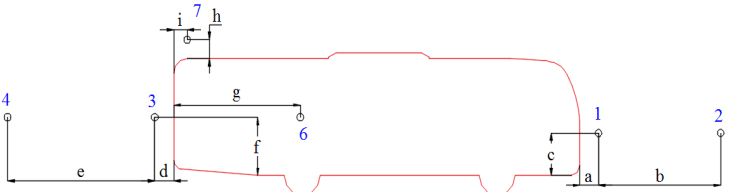
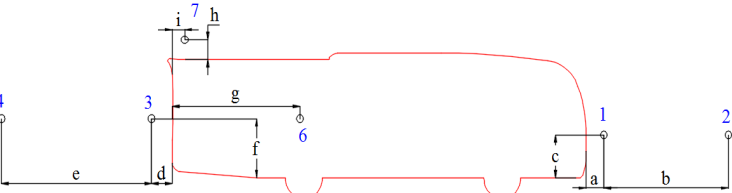
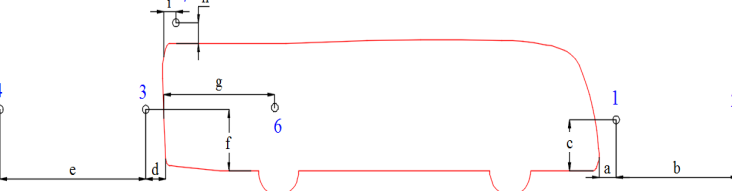
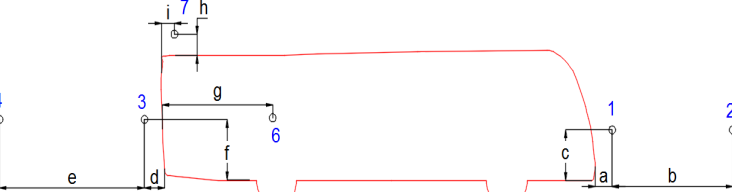
Punto 3.- está ubicado en la parte posterior cerca del bus a una distancia de ($c = 2,5 \text{ cm}$); ($d = 1,5 \text{ cm}$).

Punto 4.- ubicado en la parte posterior del bus ubicado en los puntos ($c = 2,5 \text{ cm}$); ($e = 10 \text{ cm}$).

Punto 6.- ubicado al costado derecho del perfil a una distancia ($g = 5 \text{ cm}$).

Punto 7.- ubicado en la parte posterior superior del modelo situado a una distancia ($i = 1 \text{ cm}$); ($h = 1,5 \text{ cm}$).

Tabla 4.74: Ubicación de los sensores para velocidad

MODELOS	PROTOTIPOS
<p>MODELO 1 SIN MODIFICACIONES</p>	
<p>MODELO 1 CON MODIFICACIONES</p>	
<p>MODELO 2 SIN MODIFICACIONES</p>	
<p>MODELO 2 CON MODIFICACIONES</p>	

Fuente: Los Autores

4.10.1.4. TOMA DE DATOS

Los datos fueron tomados ubicando los sensores en cada uno de los puntos descritos en las tablas 4.73 y 4.74, para presión y velocidad respectivamente.

Para medir la presión estática se conecta una sola manguera al puerto input (+), dejando del puerto output (-) desconectado, luego el puerto input (+) debe estar en contacto con el flujo dentro de la cámara, mientras el puerto output debe estar fuera.

Los datos de presión se pueden visualizar en la pantalla del fluke 922 e ir guardando los datos desde que empieza a circular el flujo por la cámara de viento, se realizó la toma de datos por cada 20 s. durante 7 min., obteniendo un total de 22 datos. El fluke 922 mide la presión diferencial de la zona de entrada con respecto a la presión atmosférica, es decir, una lectura positiva significa que la zona de entrada es positiva con respecto a la zona de

referencia. Ver Figura 4.80.

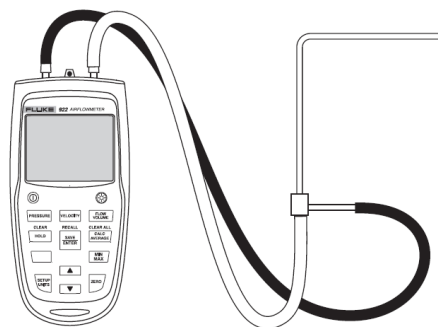


Figura 4.80: Montaje de los modelos en la cámara de prueba

Fuente: Los Autores

Para medir la velocidad de igual forma se utilizó el fluke 922, para ello se conectan los puertos al tubo Pitot y al medidor. El puerto (+) se conecta la manguera amarilla de la conexión de presión total del tubo de Pitot y el puerto (-) se conecta a la manguera negra desde la conexión de presión estática del tubo Pitot.

La velocidad tomada con el anemómetro de hilo caliente se lo realiza mediante el control de un computador, para luego ser almacenados por en un archivo Excel, con intervalos de 0,1 s.

4.11. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Mediante el análisis de resultados se establece los valores del coeficiente de dragado para los modelos sin modificaciones y con modificaciones para las diferentes velocidades de 90 km h^{-1} , 100 km h^{-1} y 120 km h^{-1} para cada modelo geométrico.

Se inició la investigación determinando los modelos que van a ser objeto de estudio y que fueron modelados en 2D con un software CAD. Luego, mediante ANSYS Fluent se analizó la dinámica del flujo de aire en un túnel de viento dando como resultado estimaciones numéricas del coeficiente de dragado y del coeficiente de sustentación. La verificación de la hipótesis se basa en determinar si las modificaciones realizadas a los modelos tomados como patrón tienen una disminución en el coeficiente de dragado. De ser así, el modelo con modificaciones sería más aerodinámico por ende el motor vence con mayor facilidad el estado de reposo y un menor consumo de combustible. Del mismo modo, si el coeficiente de sustentación está por debajo de la unidad, en los modelos con modificaciones siendo más estables en condiciones operativas. Este factor es importante a una velocidad alta y en carreteras con presencia de curvas ya que un coeficiente de sustentación menor se traduce en mayor estabilidad y seguridad a los pasajeros.

4.11.1. VERIFICACIÓN DE NORMALIDAD

Para verificar si las muestras son normales realizamos el test estadístico de Kolmogorov-Smirnov que se utiliza cuando los datos de la muestra son mayores a 50.

Para el test estadístico de Kolmogorov-Smirnov la hipótesis nula (H_0) y del investigador (H_a) son:

Ho: La variable de coeficiente de dragado de los modelos de autobuses tiene una distribución normal

Ha: La variable de coeficiente de dragado de los modelos de autobuses no se distribuye normalmente

PRUEBA ESTADÍSTICA

Para el análisis de la normalidad de los datos del test estadístico de Kolmogorov-Smirnov el nivel de confianza es del 95 %.

Tabla 4.75: Pruebas de normalidad con los datos del coeficiente de dragado

Pruebas de normalidad			
	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	gl	P_{valor}
M1	0,123	1201	$2,2 \times 10^{-16}$
M1M	0,082	1201	$2,2 \times 10^{-16}$
M1LL	0,087	1201	$2,2 \times 10^{-16}$
M1LLM	0,168	1201	$2,2 \times 10^{-16}$
M2	0,061	1201	$2,2 \times 10^{-16}$
M2M	0,101	1201	$2,2 \times 10^{-16}$
M2LL	0,097	1201	$2,2 \times 10^{-16}$
M2LLM	0,104	1201	$2,2 \times 10^{-16}$

Fuente: Los Autores

La tabla 4.75 muestra los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov, que permite evaluar si los datos tienen una distribución normal, y para ello se especifica lo siguiente.

La toma de decisión se muestra a continuación:

Si $P_{valor} \geq 0,05$ (Se acepta la hipótesis nula por ende se comporta como una distribución normal)

Si $P_{valor} < 0,05$ (Se acepta la hipótesis alternativa por ende no tiene una distribución normal)

En todos los casos el $P_{valor} = 2,2 \times 10^{-16}$ es menor que 0,05 en consecuencia se acepta H_a , es decir, la variable de coeficiente de dragado de los modelos de autobuses no se distribuye normalmente.

4.11.2. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS

Para los dos modelos 1 y 2 tenemos dos conjuntos de datos numéricos, uno sin modificaciones y otro con modificaciones. En esta sección comparamos los conjuntos anteriores en los dos casos: sin y con llantas. El propósito es verificar en cada caso si las modificaciones mejoran la aerodinámica (con C_d) y estabilidad (con C_l) de la carrocería.

4.11.2.1. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DEL COEFICIENTE DE DRAGADO

- Análisis para el modelo 1 con modificaciones y sin modificaciones.

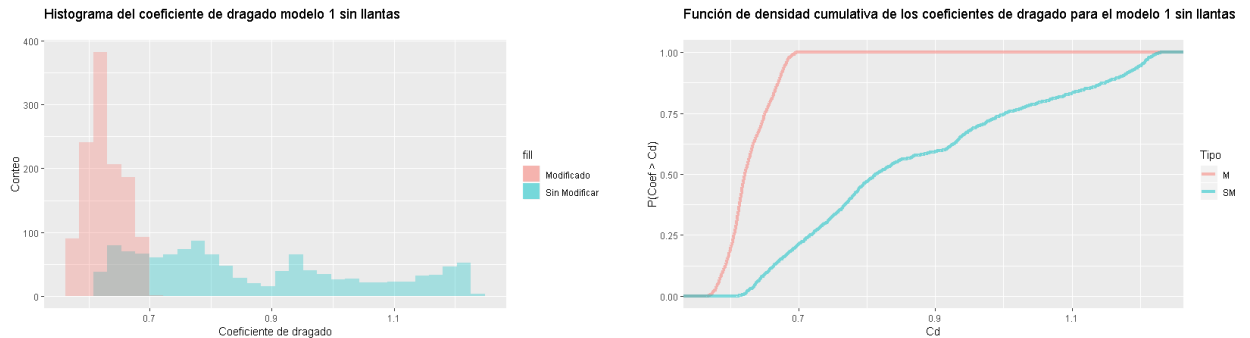


Figura 4.81: Histograma de coeficiente de dragado del modelo 1 sin llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.81 muestra la distribución en forma de histograma el coeficiente de dragado para el modelo 1 sin llantas. A través de un análisis visual de esta figura concluimos que las modificaciones realizadas si son representativas porque la gráfica del modelo con modificaciones esta desfasada a la izquierda y tiene un coeficiente de dragado promedio de 0,6272 (histograma rojo) con una desviación estándar de 0,0304, mientras que para el modelo sin modificaciones tiene un valor promedio de 0,8690 (histograma azul) con una desviación estándar de 0,1827. El término estadístico de la función de densidad acumulativa comparándose el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado es más aerodinámico.

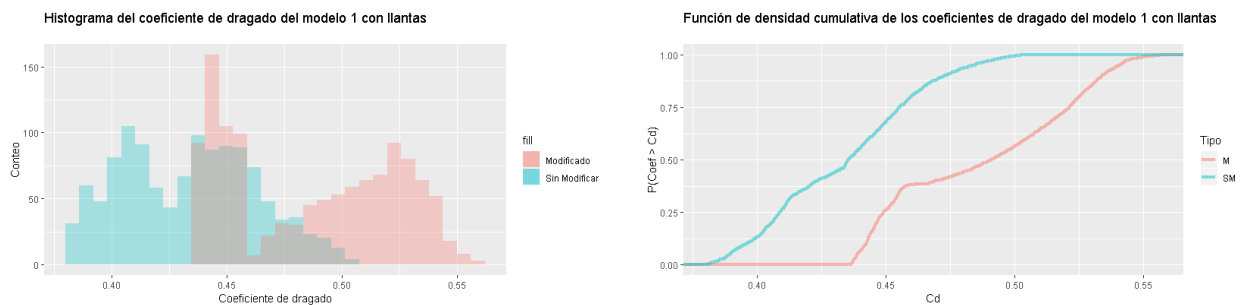


Figura 4.82: Histograma de coeficiente de dragado del modelo 1 con llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.82 muestra la distribución en forma de histograma el coeficiente de dragado para el modelo 1 con llantas. A través de un análisis visual de esta figura concluimos que las modificaciones realizadas si son representativas porque la gráfica del modelo con modificaciones esta desfasada a la derecha. Se observa que el incluir llantas en los modelos los datos hace que el coeficiente de dragado aumente. Para la gráfica con modificaciones el valor promedio del coeficiente de dragado es 0,4869 (histograma rojo) con una desviación estándar de 0,0362 y para la gráfica sin modificaciones el valor promedio es 0,4337 (histograma azul) con una desviación estándar de 0,0290. El término estadístico de la función de densidad acumulativa comparándose el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado es menos aerodinámico.

- Análisis para el modelo 2 con modificaciones y sin modificaciones.

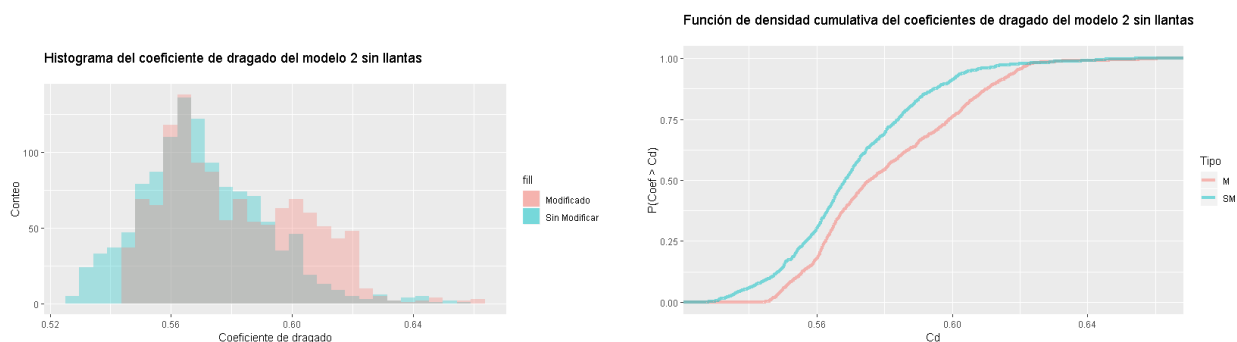


Figura 4.83: Histograma de coeficiente de dragado del modelo 2 sin llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.83 se observa de manera visual que las modificaciones realizadas al modelo no disminuye el coeficiente de dragado, pues la gráfica presenta un ligero desfase a la derecha. El valor promedio del coeficiente de dragado para el modelo modificado es 0,5807 (histograma rojo) con una desviación estándar de 0,0226, en cambio para el modelo sin modificar tiene un valor promedio de 0,5707 (histograma azul) con una desviación estándar de 0,0209. El término estadístico de la función de densidad acumulativa comparándose el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado es más aerodinámico.

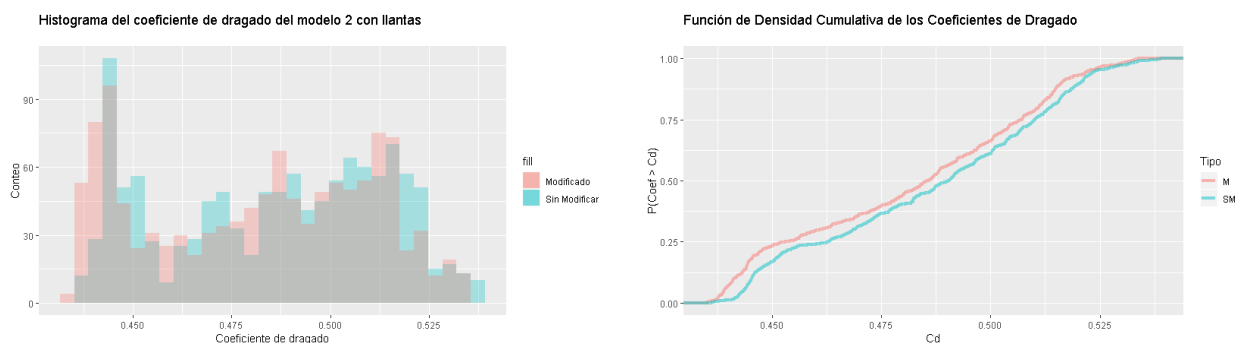


Figura 4.84: Histograma de coeficiente de dragado del modelo 2 con llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.84 muestra la distribución en forma de histograma el coeficiente de dragado para el modelo 2 con llantas. A través de un análisis visual de esta figura concluimos que las modificaciones realizadas no son representativas pese a que el coeficiente de dragado en el modelo modificado disminuye ligeramente al incluir las llantas. El valor promedio para el modelo modificado es 0,4815 (histograma rojo) con una desviación estándar de 0,0284 y para el modelo sin modificaciones es 0.4859 (histograma azul) con una desviación estándar de 0,0277. El término estadístico de la función de densidad acumulativa comparándose el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado es más aerodinámico.

4.11.2.2. DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS DEL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN

- Análisis para el modelo 1 con modificaciones y sin modificaciones.

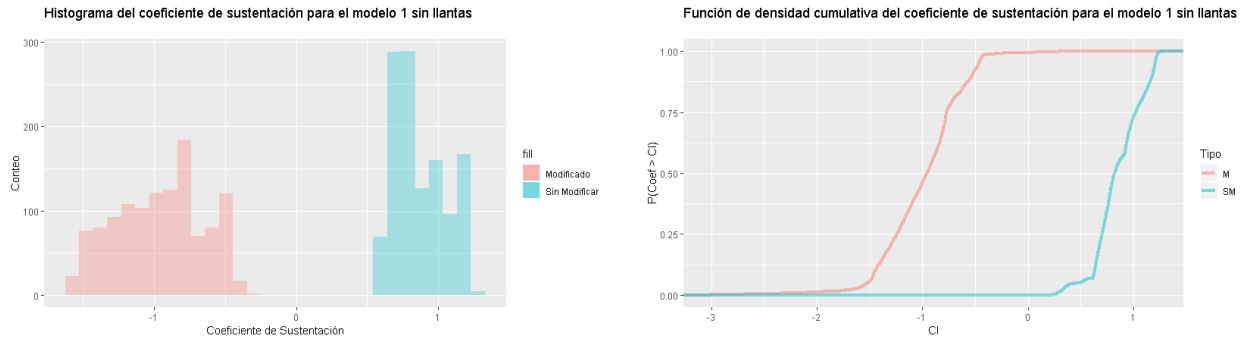


Figura 4.85: Histograma de coeficiente de sustentación del modelo 1 sin llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.85 muestra la distribución en forma de histograma el coeficiente de sustentación para el modelo 1 sin llantas. A través de un análisis visual de esta figura concluimos que las modificaciones realizadas si son representativas porque la gráfica del modelo con modificaciones esta desfasada a la izquierda y tiene un coeficiente de sustentación promedio de -0,9700 (histograma rojo), mientras que para el modelo sin modificaciones tiene un valor promedio de 0,2575 (histograma azul).

El término estadístico de la función de densidad acumulativa comparándose el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado es más estable.

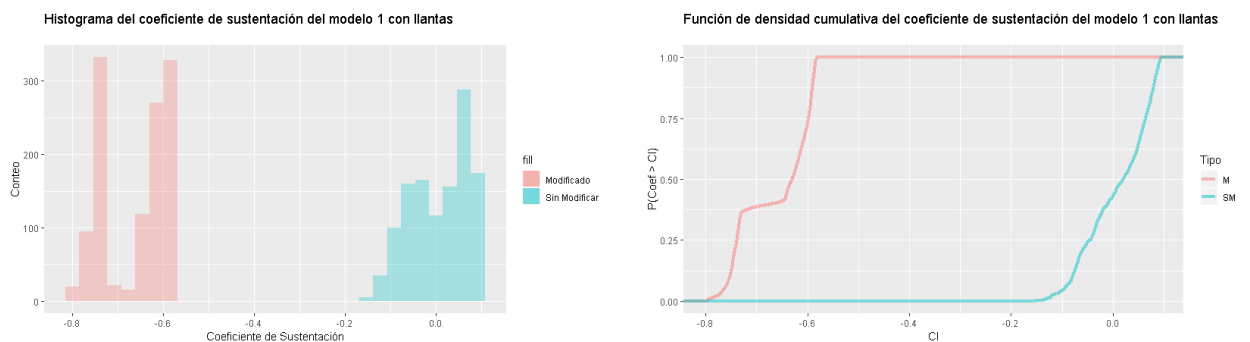


Figura 4.86: Histograma de coeficiente de sustentación del modelo 1 con llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.86 muestra la distribución en forma de histograma el coeficiente de sustentación para el modelo 1 con llantas. A través de un análisis visual de esta figura concluimos que las modificaciones realizadas si son representativas porque la gráfica del modelo con modificaciones esta desfasada a la izquierda y tiene un coeficiente de sustentación promedio de -0,6630 (histograma rojo), mientras que para el modelo sin modificaciones tiene un valor promedio de 0,0067 (histograma azul).

El término estadístico de la función de densidad acumulativa comparándose el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado es más estable.

- Análisis para el modelo 2 con modificaciones y sin modificaciones.

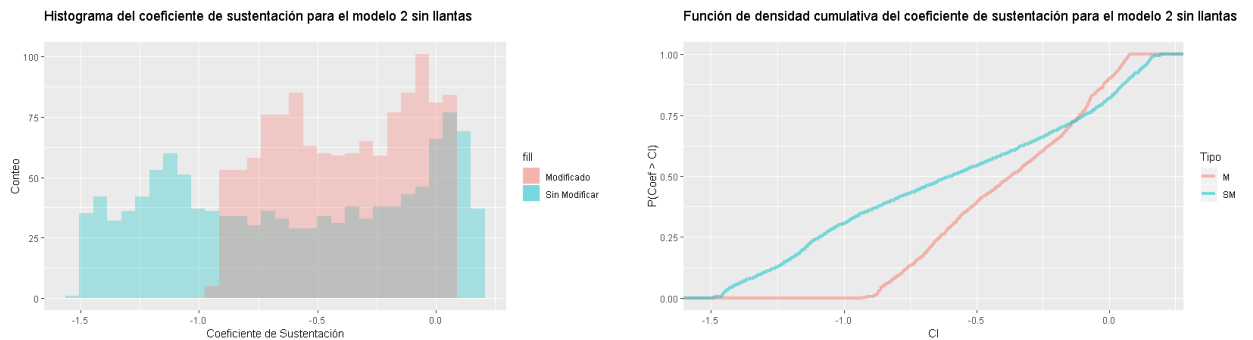


Figura 4.87: Histograma de coeficiente de sustentación del modelo 2 sin llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.87 muestra la distribución en forma de histograma el coeficiente de sustentación para el modelo 2 sin llantas. A través de un análisis visual de esta figura concluimos que las modificaciones realizadas no son representativas porque la gráfica del modelo con modificaciones se sobreponen y tienen un coeficiente de sustentación promedio de -0,3892 (histograma rojo), mientras que para el modelo sin modificaciones tiene un valor promedio de -0,6031 (histograma azul).

El término estadístico de la función de densidad acumulativa comparándose el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado sin llantas es menos estable.

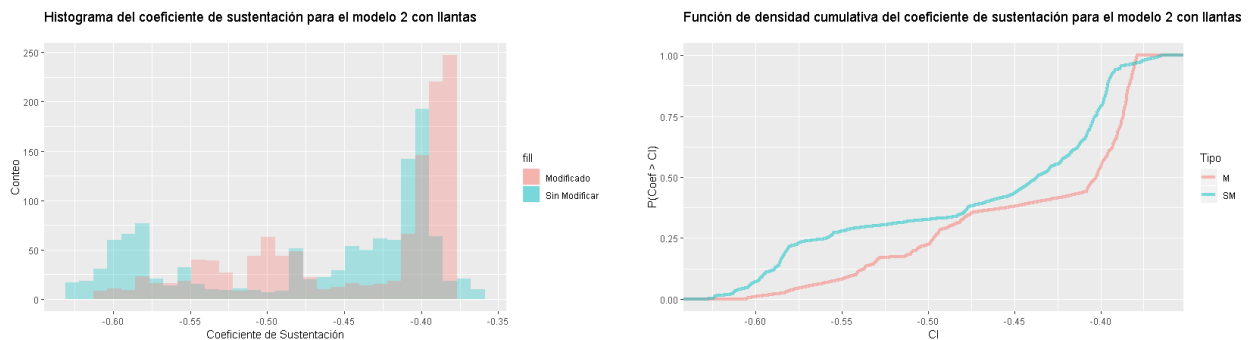


Figura 4.88: Histograma de coeficiente de sustentación del modelo 2 con llantas.

Fuente: Los Autores

La figura 4.88 muestra la distribución en forma de histograma el coeficiente de sustentación para el modelo 2 con llantas. A través de un análisis visual de esta figura concluimos que las modificaciones realizadas no son representativas porque la gráfica del modelo con modificaciones se sobreponen y tienen un coeficiente de sustentación promedio de -0,4534 (histograma rojo), mientras que para el modelo sin modificaciones tiene un valor promedio de -0,4720 (histograma azul).

El término estadístico de la función de densidad acumulativa contrastando el modelo modificado con el modelo sin modificaciones se concluye que sistemáticamente el modelo modificado con llantas es menos estable.

4.11.3. PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS

Las distribuciones de los coeficientes de dragado y sustentación no son normales y el análisis realizado en la sección anterior solo permite comparar valores medios de forma sistemática y cualitativa. Por ello procedemos en esta sección a realizar tests no paramétricos que permiten cuantificar si las modificaciones realizadas son significativas desde el punto de vista estadístico.

Los tests estadísticos utilizados son: U de Mann-Whitney compara un valor seleccionado aleatoriamente de una muestra con otro valor seleccionado aleatoriamente de una segunda muestra, y W de Wilcoxon que permiten contrastar dos muestras relacionadas para evaluar si los rangos medios de la población difieren. Por ello las hipótesis nula y alternativa son:

Ho: No hay diferencia estadísticamente significativa entre los autobuses sin y con modificaciones.

Ha: Existe diferencia estadísticamente significativa entre los autobuses sin y con modificaciones.

El criterio para la toma de decisión se enuncia a continuación:

Si $P_{valor} \geq 0,05$ (Se acepta la hipótesis nula)

Si $P_{valor} < 0,05$ (Se acepta la hipótesis alternativa o hipótesis del investigador)

En todos los casos el P_{valor} es ~ 0 siendo menor que 0,05 en consecuencia se acepta Ha. Es decir existe una diferencia significativa entre los datos de los autobuses.

Tabla 4.76: Prueba no paramétrica para el coeficiente de dragado

Estadísticos de prueba				
	MODELO 2	MODELO 1	MODELO 2 LL	MODELO 1 LL
U de Mann-Whitney	550640,00	1371400,00	789730,00	212160,00
W de Wilcoxon	236390,00	713840,00	407920,00	36885,00
P_{valor}	$2,2 \times 10^{-16}$	$2,2 \times 10^{-16}$	$7,322 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-16}$

Fuente: Los Autores

Tabla 4.77: Prueba no paramétrica para el coeficiente de sustentación

Estadísticos de prueba				
	MODELO 2	MODELO 1	MODELO 2 LL	MODELO 1 LL
U de Mann-Whitney	559090,00	1440000,00	503510,00	1440000,00
W de Wilcoxon	220100,00	720600,00	148490,00	720600,00
P_{valor}	$2,2 \times 10^{-16}$	$2,2 \times 10^{-16}$	$2,2 \times 10^{-16}$	$2,2 \times 10^{-16}$

Fuente: Los Autores

4.11.3.1. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE DATOS

Luego de realizar las pruebas no paramétricas y estadísticamente se acepta la hipótesis alternativa. Es decir los resultados son significativamente diferentes en los casos de estudio.

Una matriz de correlación se muestra a continuación:

Tabla 4.78: Matriz de correlación de coeficientes aerodinámicos.

Matriz de correlación de coeficientes aerodinámicos.				
	M1	M1LL	M2	M2LL
¿El coeficiente de dragado es menor en los modelos modificados.?	Sí	No	No	Sí
¿El valor del C_d es estadísticamente significativo.?	Sí	Sí	Sí	Sí
¿El coeficiente de sustentación es menor en los modelos modificados.?	Sí	Sí	Sí	No
¿El valor del C_l es estadísticamente significativo.?	Sí	Sí	Sí	Sí

Fuente: Los Autores

4.12. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para realizar el análisis de las pruebas experimentales y poder comparar con los resultados numéricos se realizaron los ensayos mediante técnicas de visualización de flujo con los cuales se pudo captar cómo las cuerdas se mueven formando ondas en su recorrido. Para la visualización se utilizaron hilos de lana que fueron sujetos al modelo del autobús para visualizar su oscilación a medida que interactúan con el flujo. Es así que los datos experimentales fueron tomados de las pruebas realizadas, datos como: el período y la longitud de onda. Para determinar el período se utilizaron fotografías en secuencia.

4.12.1. ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA DE DESPRENDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para el análisis de las pruebas experimentales se toman los datos para el modelo 1 y modelo 2 de la tabla 3.10 como son la longitud característica, la velocidad del flujo, y el número de Reynolds. Con ellos, se realiza el cálculo de la frecuencia de desprendimiento para los modelos 1 (M1) y modelo 2 (M2).

En primera instancia se calcula el número de Strouhal con la fórmula 2.13 y luego la frecuencia de desprendimiento con la fórmula 2.12. El período, la frecuencia y el cálculo del error relativo entre el período numérico y el experimental.

Tabla 4.79: Resultados de Modelos 1 y 2

Modelos	Parámetros calculados				
	Número de Strouhal calculado	Período	Frecuencia de desprendimiento	Período experimental	Error relativo del período
Unidades	Sr_c	$T_c [s]$	$f_c [Hz]$	T_{exp}	$\varepsilon [\%]$
Modelo 1	0,27286	1,77377	0,56377	0,77	56,6 %
Modelo 2	0,27287	1,92036	0,52074	0,65	66,15 %

Fuente: Los Autores

La tabla 4.79 muestra los resultados del análisis numérico para los modelos 1 y 2. Los resultados se basan en las fórmulas disponibles como el número de Strouhal (ecuación (2.12)), para obtener la frecuencia de desprendimiento. El período experimental reportado en la tabla ha sido tomado después de verificar el tiempo que tarda la cuerda en realizar un ciclo. La comparación entre los ensayos numéricos y experimentales refleja un error del 56,6 % del modelo 1 y un 66,15 % del modelo 2. Esto se debe a diferentes razones como: la resolución y velocidad de la cámara que iba captando los cambios en las cuerdas. Por ende la frecuencia de desprendimiento experimental es:

$$f_{exp} = \frac{1}{T_{exp}}$$

Para el modelo 1 la frecuencia de desprendimiento será:

$$f_{exp} = \frac{1}{0,77 \text{ s}}$$

$$f_{exp} = 1,2987 \text{ Hz}$$

Mientras, para el modelo 2, la frecuencia de desprendimiento será:

$$f_{exp} = \frac{1}{0,65 \text{ s}}$$

$$f_{exp} = 1,5385 \text{ Hz}$$

4.12.2. ANÁLISIS DE LA LONGITUD DE LA ONDA

La longitud de onda está determinada por la distancia de cresta a cresta de la onda o de la distancia entre el valle y valle de la misma, para lo cual se tomó una imagen que muestra el comportamiento de las cuerdas en la parte posterior del autobús.

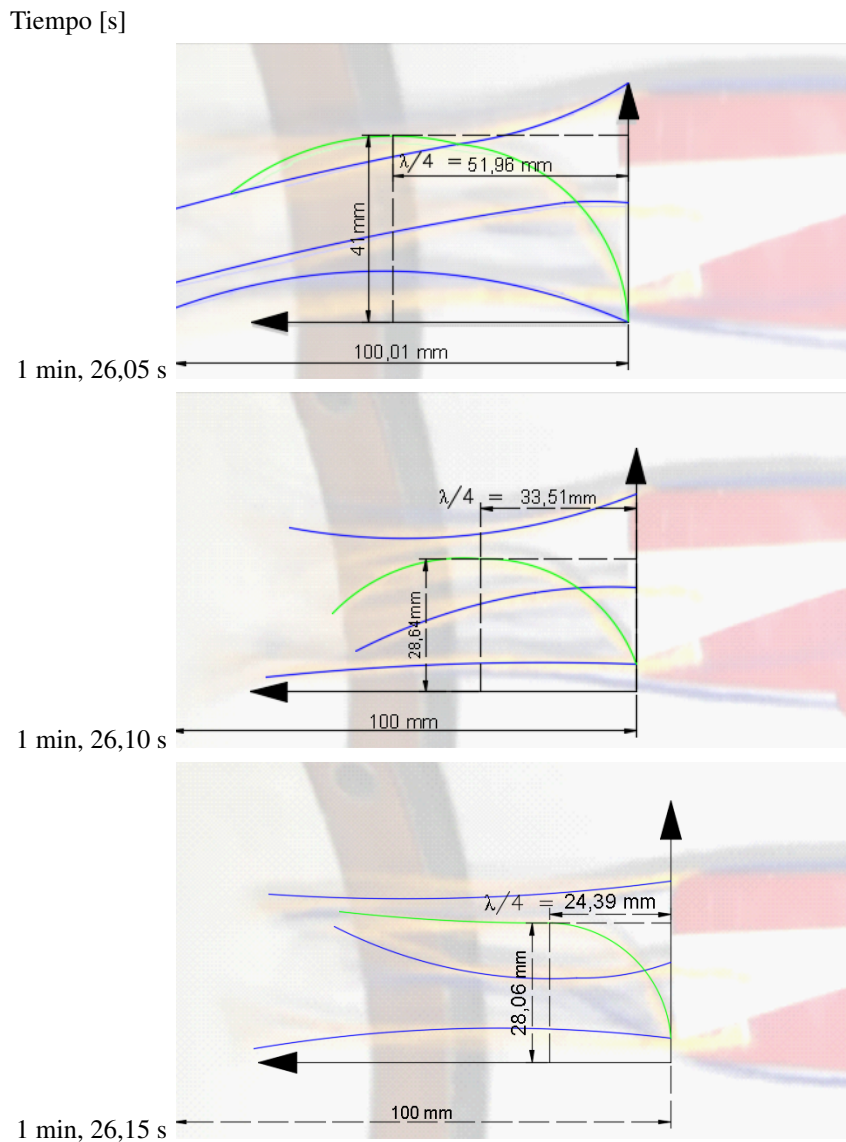


Figura 4.89: Se visualiza el movimiento oscilatorio de las cuerdas con un paso de tiempo de 0,05 [s].

Fuente: Los Autores

En la figura 4.89 se observa el comportamiento oscilatorio de las cuerdas para lo cual se tomó la línea verde como patrón para realizar el análisis ya que se visualiza de mejor manera las fluctuaciones. La cuerda desde el borde posterior del modelo mide 100 mm, como se observa en la figura permitiéndonos encontrar la distancia desde el origen hasta el punto medio de la cresta de la gráfica lo cual representa la cuarta parte del total de la longitud de la onda. Realizamos tres mediciones a distintos tiempos y realizamos un promedio para este análisis (λ).

Para determinar la longitud de la onda λ experimental:

$$\frac{\lambda}{4} = 36,62 \text{ [mm]}$$

$$\lambda_{\text{exp}} = 146,48 \text{ [mm]}$$

$$\lambda_{\text{exp}} = 0,1465 \text{ [m]}$$

Para determinar el número de onda k experimental o número de onda tenemos:

$$k_{\text{exp}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{exp}}}$$

$$k_{\text{exp}} = \frac{2\pi}{0,1465 \text{ m}}$$

$$k_{\text{exp}} = 42,88 \frac{\text{rad}}{\text{m}}$$

Para determinar la rapidez de la onda experimental (v) tenemos:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$v = \frac{42,88 \text{ m}}{0,77 \text{ s}}$$

$$v = 55,69 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para determinar la velocidad angular (ω) tenemos:

$$\omega_{\text{exp}} = 2\pi f_{\text{exp}}$$

$$\omega_{\text{exp}} = 2\pi(1,2987 \text{ Hz})$$

$$\omega_{\text{exp}} = 8,1599 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Mediante la gráfica 4.89, se observa que la propagación de onda es hacia la izquierda, esto indica que a cualquier velocidad en el sentido contrario al eje x positivo, el signo que gobierna la ecuación de la onda es positivo, esta se expresa como:

$$y(x, t) = X \cos(k_{\text{exp}}x + \omega_{\text{exp}}t) \tag{4.5}$$

$$y(x, t) = 0,0326 \cos(42,88x + 8,1599t) \text{ [m]}$$

Donde:

$y(x,t)$ = Función de la onda [m]

X = Amplitud de onda o tamaño de vórtices [m]

x = Posición de la onda [m]

t = Tiempo [s]

Luego de estimar la ecuación de la onda (4.5) para las oscilaciones que genera el flujo a través del modelo 1 a escala, se gráfica para diferentes tiempos: 120 s., 150 s., y 180 s.

La ecuación de la onda permite visualizar el comportamiento de las líneas de flujo a una velocidad de 90 km h^{-1} para el modelo 1 a escala, sin embargo el mismo comportamiento tendrían las líneas de flujo para el modelo 2.

Debido a la limitación de la resolución de la cámara usada para captar las imágenes no se puede realizar un análisis de mayor precisión para ambos modelos.

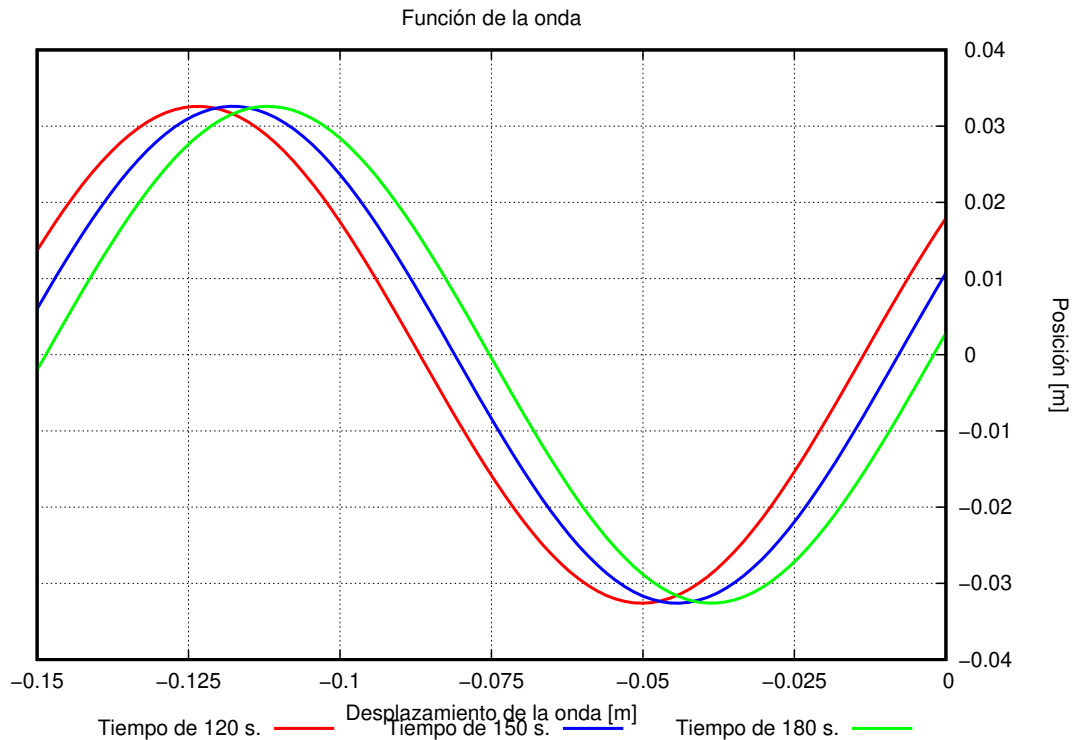


Figura 4.90: La ecuación de la onda predice el movimiento de las oscilaciones que tendrán las líneas de flujo a 90 km h^{-1} , a diferentes tiempos para el modelo 1 a escala.

Fuente: Los Autores

4.12.3. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE DRAGADO Y SUSTENTACIÓN

4.12.3.1. ESTIMACIÓN DE COEFICIENTE DE DRAGADO

Para poder estimar el cálculo del coeficiente de dragado y sustentación se realizó consideraciones como: densidad del fluido constante ($\rho = 1,20 \text{ kg m}^{-3}$) (ver anexo 7.2), temperatura constante ($T = 21^\circ\text{C}$), y velocidad constante ($v = 25 \text{ m s}^{-1}$), con ello usando las ecuaciones (2.39), y (2.38) para el coeficiente de dragado y sustentación respectivamente tenemos:

Para el modelo 1 sin modificaciones, sabiendo por definición la presión de remanso o presión total está dada por:

$$P_o = P_s + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (4.6)$$

Donde P_o es la presión total o de remanso, P_s es la presión estática, y $\frac{1}{2}\rho v^2$ es la presión dinámica del flujo. El tubo de pitot nos arroja datos de la presión dinámica por lo que se puede estimar la fuerza de presión con los puntos de presión 1 y 3 medidos antes, así:

$$F_d = (P_{frontal} - P_{posterior}) * A$$

Donde: F_d es fuerza ejercida por la presión, $P_{frontal}$ y $P_{posterior}$ son la presión dinámica frontal y posterior respectivamente, la presión frontal es el promedio de los datos tomados en el punto 1, mientras que para la presión del punto posterior es del punto 3, y A es área transversal del modelo a escala ($A = 2,184 \times 10^{-3} \text{ m}^2$).

La fuerza ejercida por la presión será:

$$F_d = 0,76 \text{ N}$$

Luego con la ecuación (2.39) se estima el C_d teniendo un valor de:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho A v^2}$$

$$C_d = \frac{2(0,76)}{(1,20)(2,184 \times 10^{-3})(25^2)}$$

$$C_d = 0,928$$

Para el cálculo del coeficiente de sustentación se utiliza en mismo procedimiento que para el dragado, con la diferencia que los puntos serán el 2 ($P_{inferior}$) y 4 ($P_{superior}$) para el cálculo de la fuerza ejercida por la presión (F_l), el área efectiva para este caso será $A = 4,80 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

El valor de C_l usando la ecuación (2.38) será:

$$C_l = \frac{2F_l}{\rho A v^2}$$

$$C_l = \frac{2(-0,35)}{(1,20)(4,80 \times 10^{-3})(25^2)}$$

$$C_l = -0,111$$

Definido el procedimiento para los demás casos tendremos:

Tabla 4.80: Resultados de modelo 1 a diferentes velocidades

	Resultados experimentales			
	Modelo 1			
	Sin modificar		Modificado	
Parámetro	C_d	C_l	C_d	C_l
Unidades	[adimensional]	[adimensional]	[adimensional]	[adimensional]
90 km h ⁻¹	0,928	-0.111	0,772	-0,736
100 km h ⁻¹	0,972	-0,104	0,794	-0,691
120 km h ⁻¹	1,032	-0,097	0,816	-0,646

Fuente: Los Autores

Para el modelo 2, con las consideraciones antes mencionadas se estima de la misma forma el coeficiente de dragado y sustentación a las diferentes velocidades.

Tabla 4.81: Resultados de modelo 2 a diferentes velocidades

	Resultados experimentales			
	Modelo 2			
	Sin modificar		Modificado	
Parámetro	C_d	C_l	C_d	C_l
Unidades	[adimensional]	[adimensional]	[adimensional]	[adimensional]
90 km h ⁻¹	0,709	-0.321	0,801	-0,427
100 km h ⁻¹	0,775	-0,280	0,850	-0,405
120 km h ⁻¹	0,841	-0,239	0,899	-0,383

Fuente: Los Autores

4.13. COMPARACIÓN DATOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

Una vez postprocesados los datos numéricos y experimentales, el siguiente paso es poder contrastar los resultados e interpretar lo obtenido.

4.13.1. COMPARACIÓN DE COEFICIENTE DE DRAGADO Y SUSTENTACIÓN DEL MODELO 1 Y 2

La tabla 4.82, donde el $C_{d\text{ exp}}$ corresponde al coeficiente de dragado experimental, y $C_{d\text{ num}}$ corresponde al obtenido mediante el análisis numérico. Al contrastar los datos numéricos con los experimentales, tienen una diferencia de orden de $\sim 6\%$ para el modelo sin modificaciones, y para el modelo con modificaciones el orden de la diferencia es $\sim 20\%$.

Tabla 4.82: Comparación de datos numéricos y experimentales del C_d para el modelo 1 a diferentes velocidades

	Comparación de resultados					
	Modelo 1					
	Sin modificar			Modificado		
Parámetro	$C_{d\text{ exp}}$	$C_{d\text{ num}}$	Diferencia porcentual	$C_{d\text{ exp}}$	$C_{d\text{ num}}$	Diferencia porcentual
Unidades	[adimensional]	[adimensional]	[%]	[adimensional]	[adimensional]	[%]
90 km h ⁻¹	0,928	0,885	4,63 %	0,772	0,623	19,30 %
100 km h ⁻¹	0,972	0,901	7,30 %	0,794	0,635	20,03 %
120 km h ⁻¹	1,032	0,963	6,69 %	0,816	0,645	20,96 %

Fuente: Los Autores

Las diferencias encontradas se atribuyen al control del entorno, el montaje de los modelos prototipos a escala de carrocerías, la ubicación de los sensores dentro de la cámara del túnel de viento, la calibración de los instrumentos de medición, y las condiciones metrológicas al momento de realizar los ensayos.

Para el coeficiente de sustentación la diferencia es de orden $\sim 75\%$ para el modelo 1 sin modificaciones, mientras para el modelo 1 modificado la diferencia es de 40% aproximadamente, en la tabla 4.83 muestra la diferencia de manera detallada.

Tabla 4.83: Comparación de datos numéricos y experimentales del C_l para el modelo 1 a diferentes velocidades

	Comparación de resultados					
	Modelo 1					
	Sin modificar			Modificado		
Parámetro	$C_{l \text{ exp}}$	$C_{l \text{ num}}$	Diferencia porcentual	$C_{l \text{ exp}}$	$C_{l \text{ num}}$	Diferencia porcentual
Unidades	[adimensional]		[%]	[adimensional]		[%]
90 km h ⁻¹	-0,111	-0,258	132,43 %	-0,736	-0,970	31,79 %
100 km h ⁻¹	-0,104	-0,206	98,08 %	-0,691	-0,961	39,07 %
120 km h ⁻¹	-0,097	-0,093	4,12 %	-0,646	-0,956	47,99 %

Fuente: Los Autores

Para el modelo 2 se realiza un contraste de los resultados obtenidos en las simulaciones y los determinados de manera experimental. Así la diferencia para el modelo 2 sin modificaciones es de 28% , mientras para el modelo 2 modificado tiene un orden de 30% de diferencia. A continuación, se detallan los resultados obtenidos:

Tabla 4.84: Comparación de datos numéricos y experimentales del C_d para el modelo 2 a diferentes velocidades

	Comparación de resultados					
	Modelo 2					
	Sin modificar			Modificado		
Parámetro	$C_{d \text{ exp}}$	$C_{d \text{ num}}$	Diferencia porcentual	$C_{d \text{ exp}}$	$C_{d \text{ num}}$	Diferencia porcentual
Unidades	[adimensional]		[%]	[adimensional]		[%]
90 km h ⁻¹	0,709	0,571	19,46 %	0,801	0,580	27,59 %
100 km h ⁻¹	0,775	0,573	26,06 %	0,850	0,593	30,24 %
120 km h ⁻¹	0,841	0,577	31,39 %	0,899	0,611	32,04 %

Fuente: Los Autores

El coeficiente de sustentación por otro lado muestra un comportamiento significativo para el modelo 2 sin modificaciones teniendo una diferencia de 110% aproximadamente, mientras para el modelo 2 modificado su diferencia disminuye hasta $\sim 7\%$. Estos datos se detallan en la tabla 4.85:

Tabla 4.85: Comparación de datos numéricos y experimentales del C_1 para el modelo 2 a diferentes velocidades

	Comparación de resultados					
	Modelo 2					
	Sin modificar			Modificado		
Parámetro	$C_{1 \text{ exp}}$	$C_{1 \text{ num}}$	Diferencia porcentual	$C_{1 \text{ exp}}$	$C_{1 \text{ num}}$	Diferencia porcentual
Unidades	[adimensional]		[%]	[adimensional]		[%]
90 km h ⁻¹	-0,321	-0,603	87,85 %	-0,427	-0,389	8,10 %
100 km h ⁻¹	-0,280	-0,599	113,93 %	-0,405	-0,398	1,74 %
120 km h ⁻¹	-0,239	-0,581	143,10 %	-0,383	-0,364	4,97 %

Fuente: Los Autores

4.13.2. COMPARACIÓN DE VELOCIDAD, PRESIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL

La diferencia entre los resultados numéricos y experimentales varían en 100 Pa para la presión en los puntos que fueron medidos, mientras para la velocidad del flujo el valor de diferencia fue de 3 m s⁻¹. Sin embargo en cierto puntos de medición los valores numéricos y experimentales se intercalan indicando que los datos numéricos y experimentales concuerdan.

Las condiciones del entorno, el montaje de los sensores pudieron hacer variar dichos resultados en la parte experimental, así como la calibración de los sensores.

Las figuras 4.91, 4.92, 4.93 y 4.94 muestran la diferencia que tiene la velocidad entre el análisis numérico y el experimental representados por las curvas de color azul y rojo respectivamente. Para el modelo 1 sin modificaciones y con llantas.

Las figuras 4.95, 4.96, 4.97, 4.98 y 4.99 muestran la diferencia que tiene la presión entre el análisis numérico y el experimental representados por las curvas de color azul y rojo respectivamente. Para el modelo 1 sin modificaciones y con llantas.

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

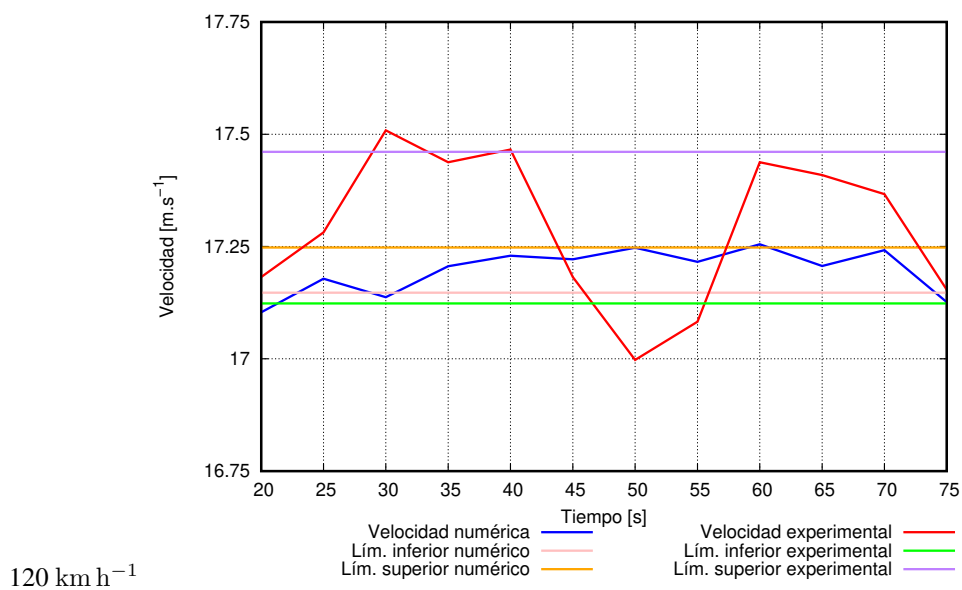
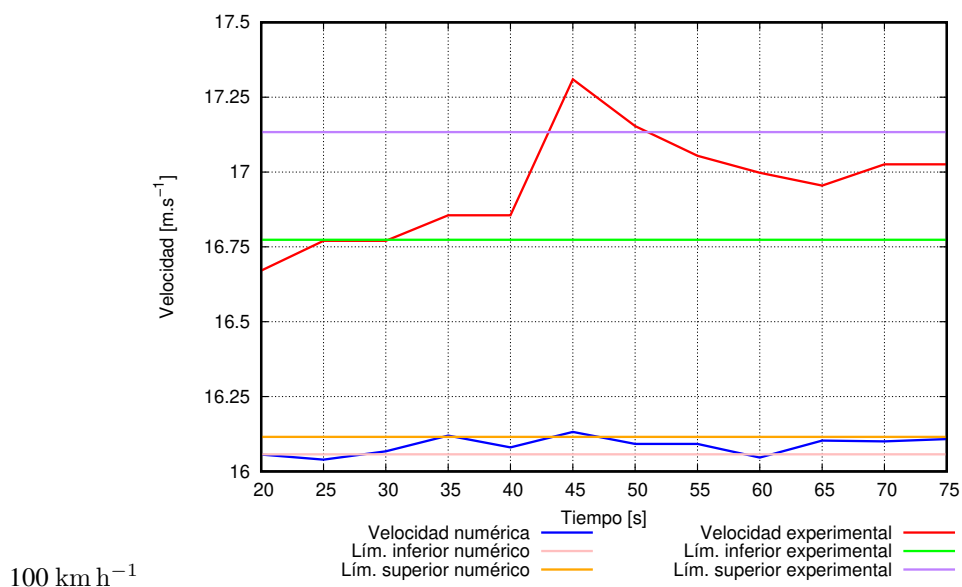
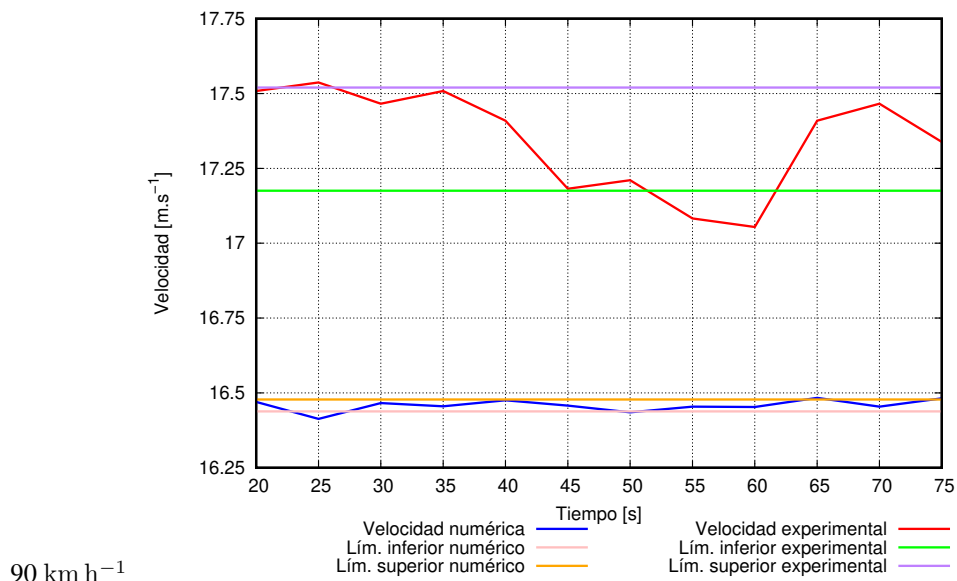


Figura 4.91: Las figuras, muestran las velocidades en el punto 1, la velocidad experimental es superior a la numérica en los tres casos de análisis, mientras cuando la velocidad es 120 km h^{-1} estás se solapan.

Fuente: Los Autores

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

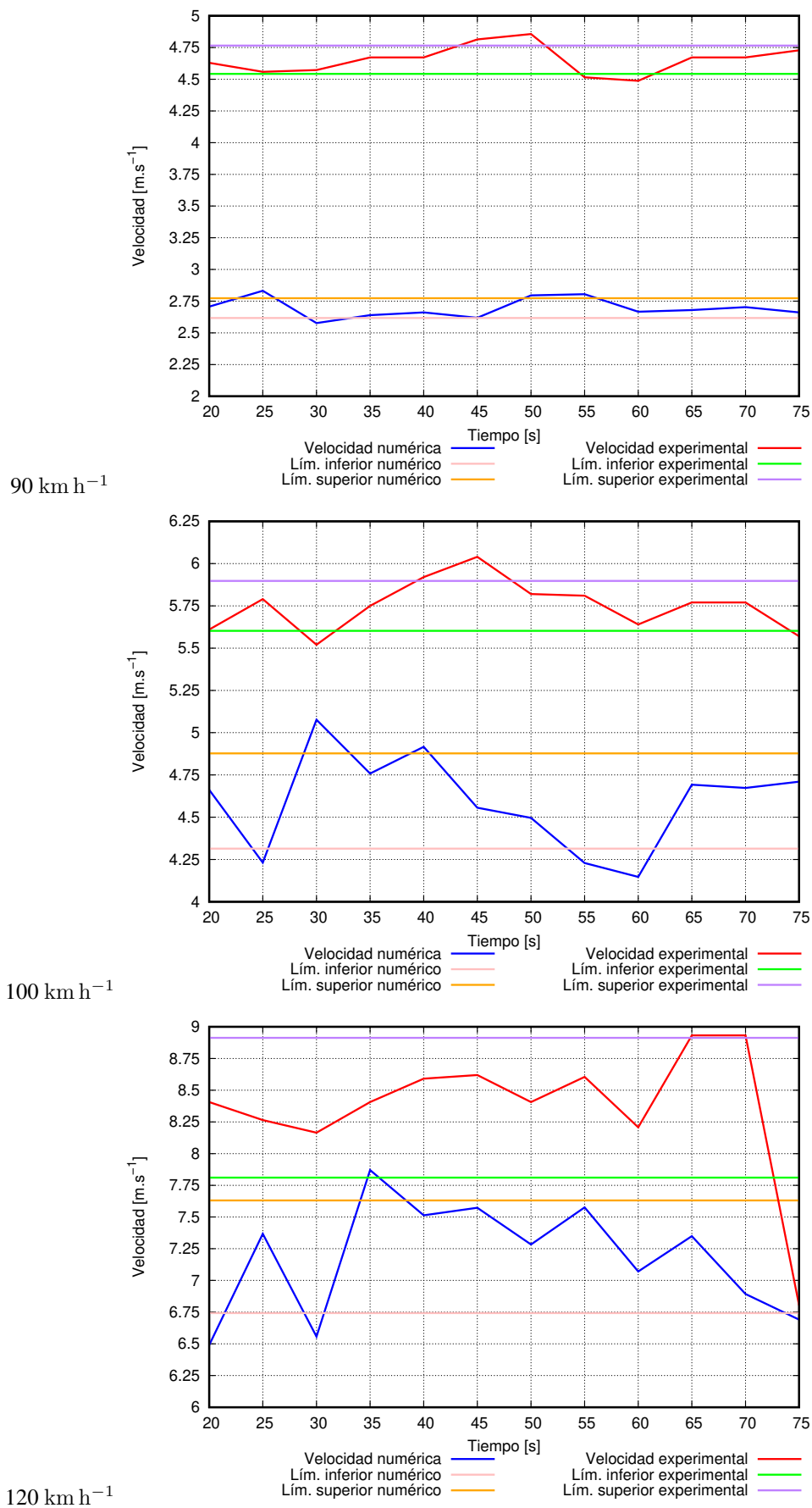


Figura 4.92: Las figuras, muestran las velocidades en el punto 3, los valores experimentales son superiores a los numéricos, sin embargo, para la velocidad 120 km h^{-1} hay cierta similitud.

Fuente: Los Autores

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

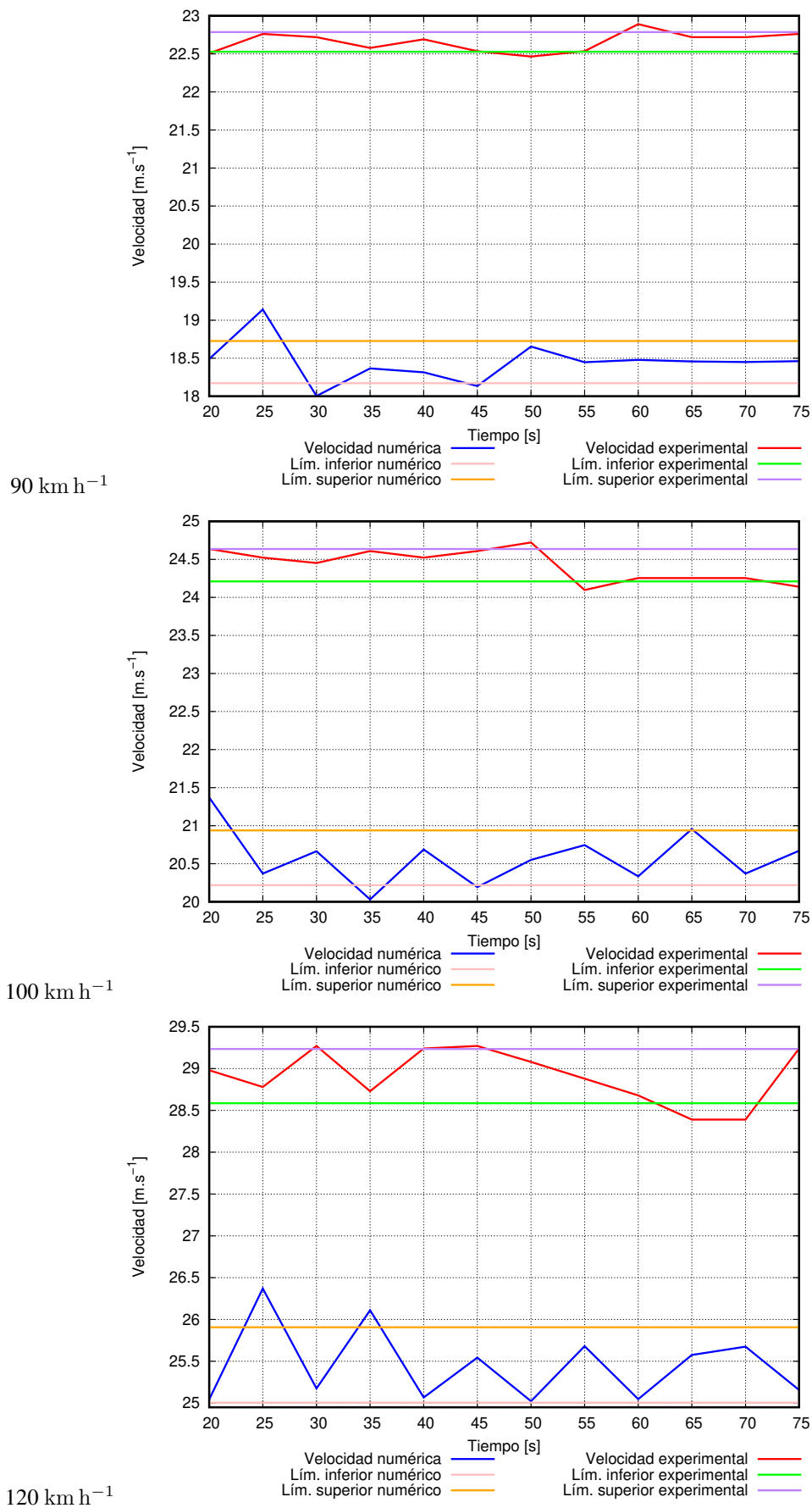


Figura 4.93: Las figuras, muestran las velocidades en el punto 4, la velocidad experimental es mayor a la numérica, sin embargo la diferencia entre ellas es aproximadamente 3 m s^{-1} para los tres casos.

Fuente: Los Autores

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

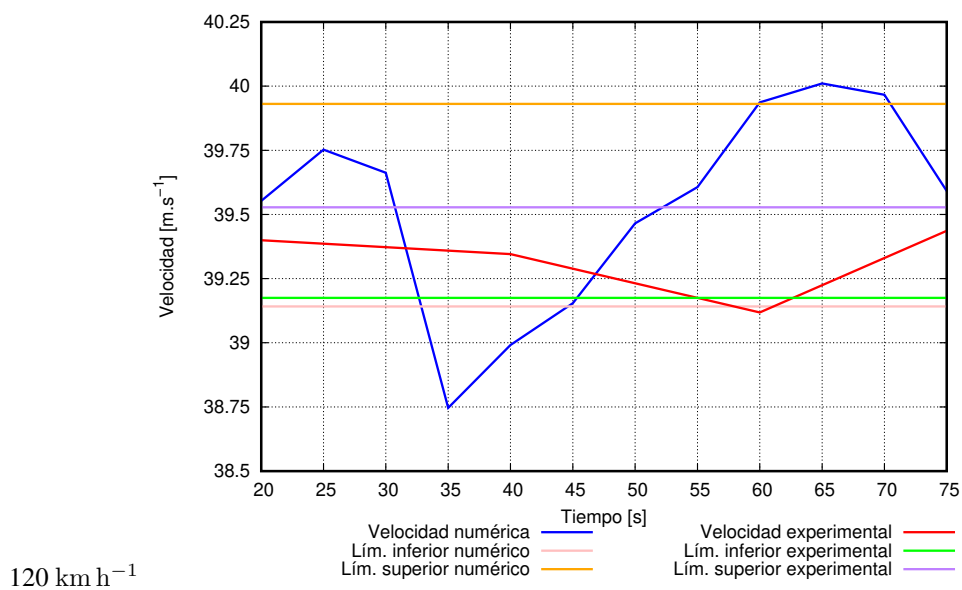
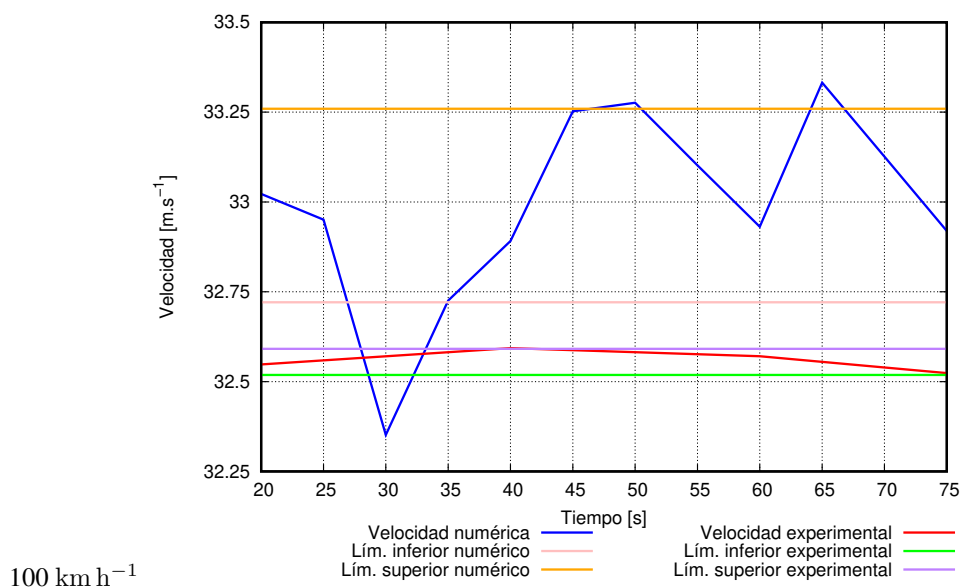
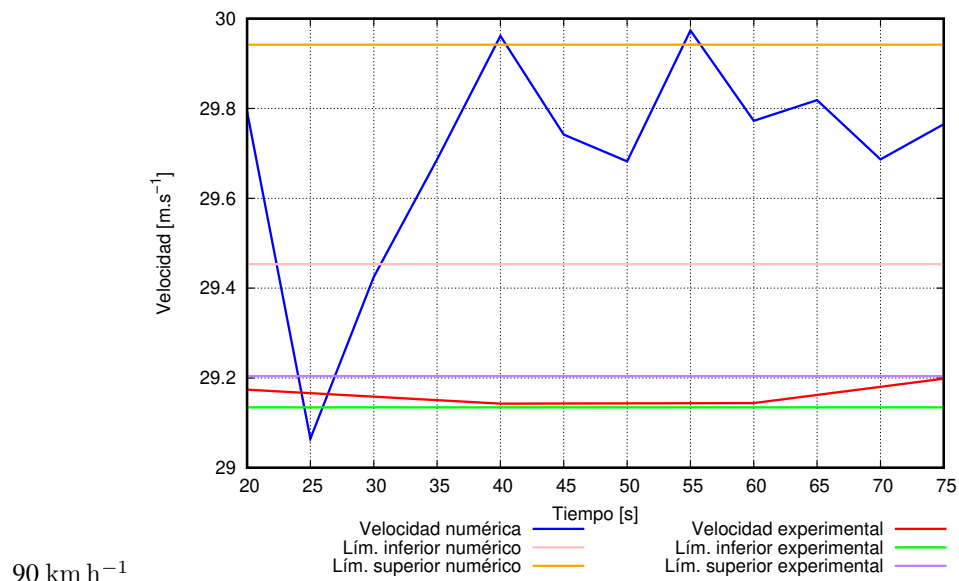


Figura 4.94: Las figuras, muestran las velocidades en el punto 7, en estos casos las velocidades se solapan entre las velocidades y numéricas, siendo mayor la velocidad numérica en todos los casos analizados.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

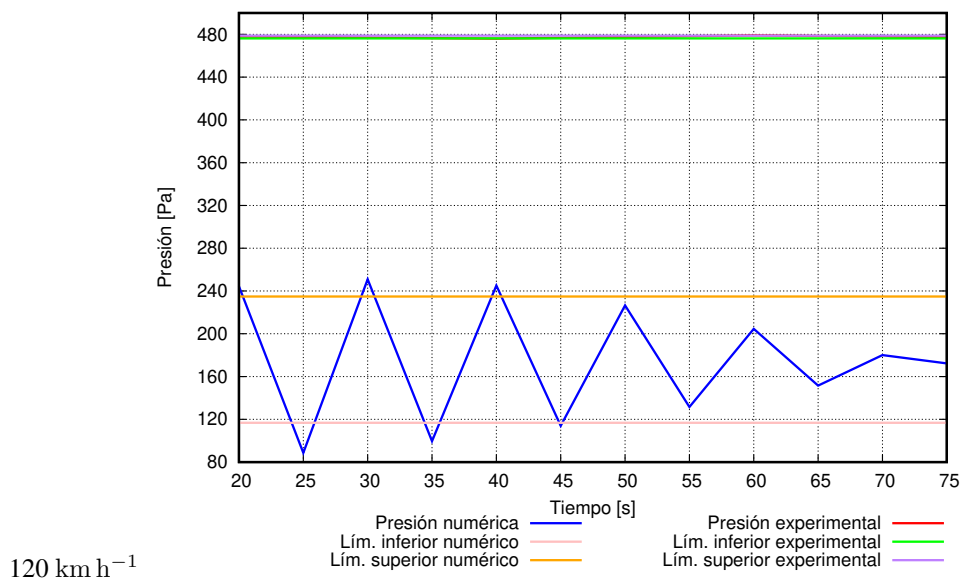
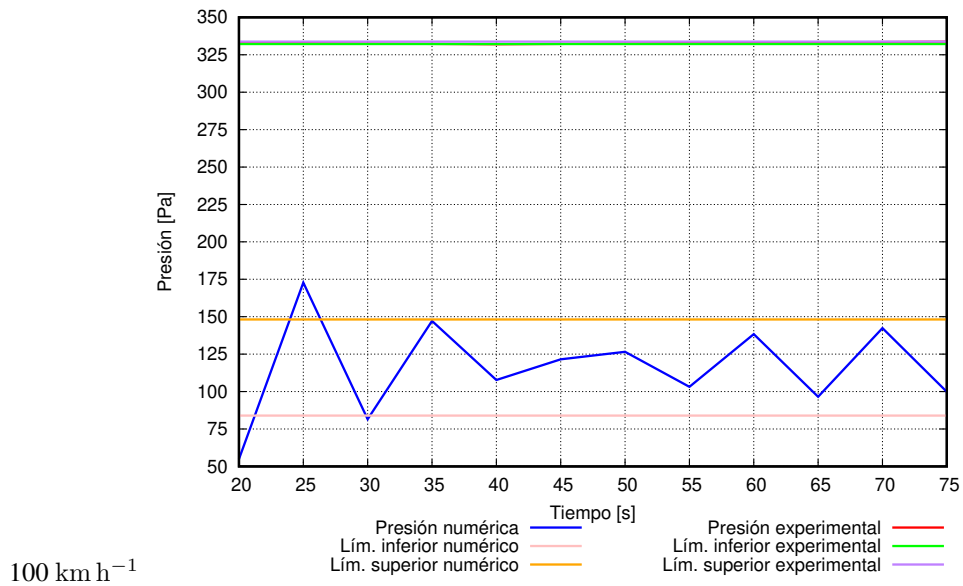
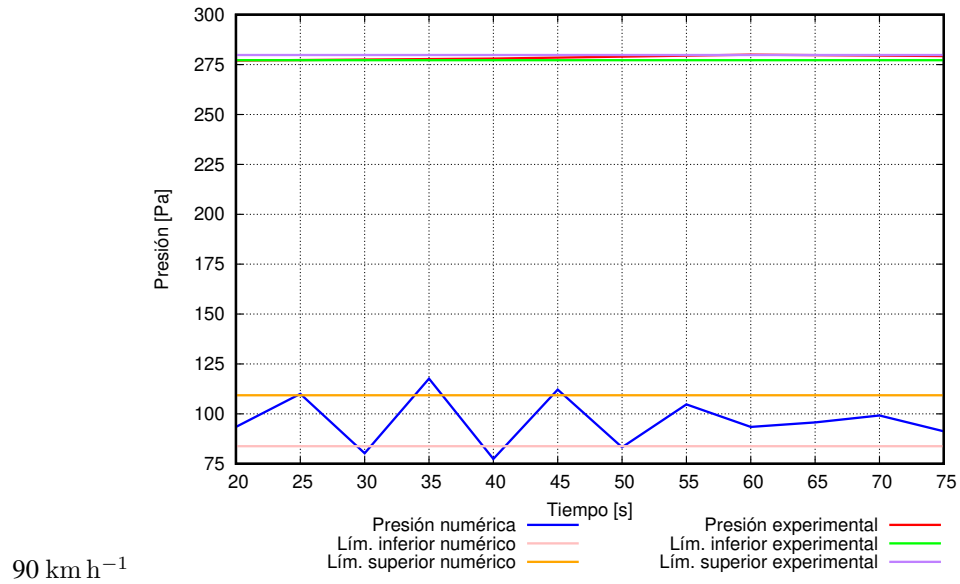


Figura 4.95: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 1, sin embargo las curvas de numéricas y experimentales no se solapan por la gran diferencia que presentan.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

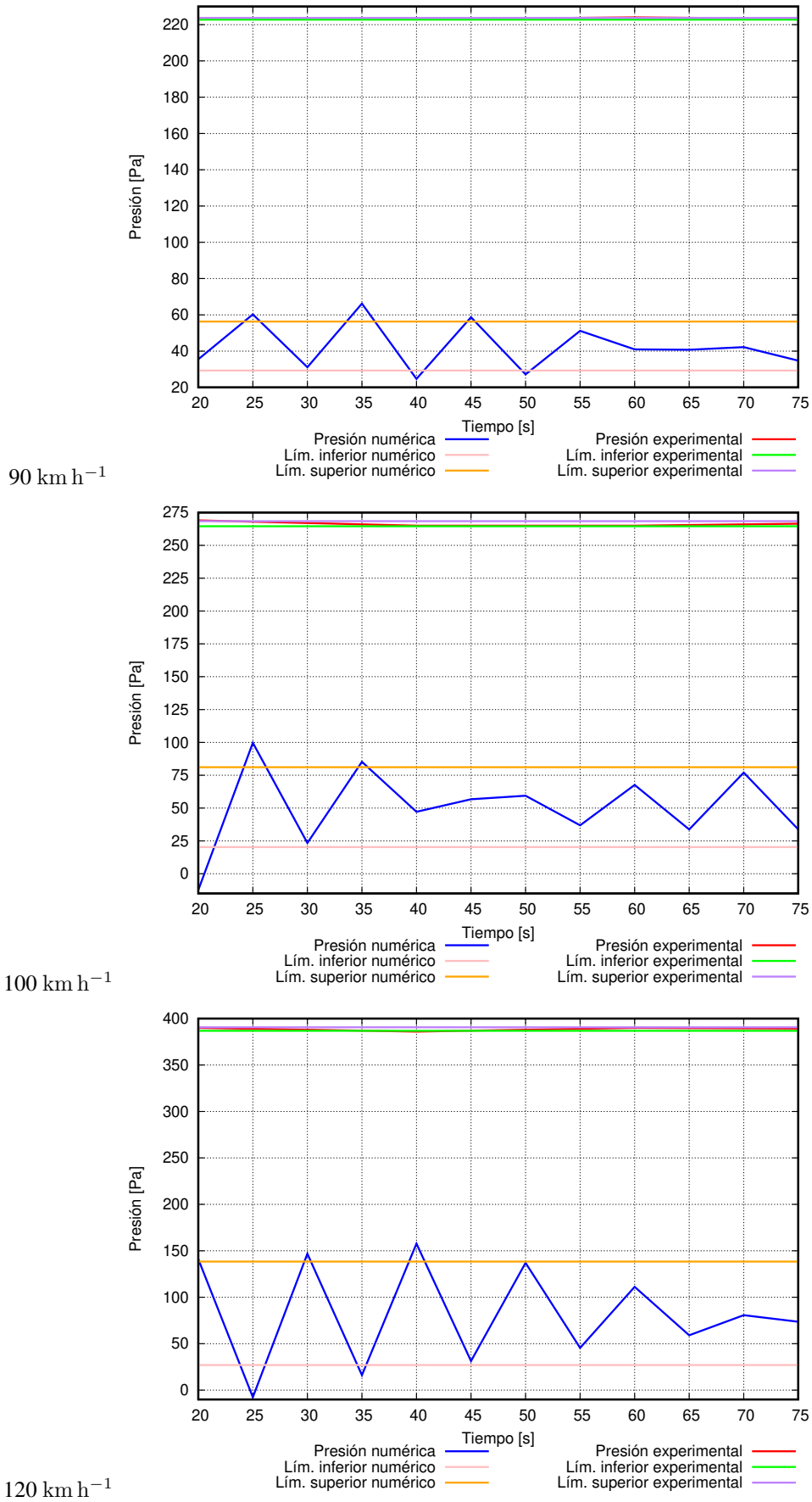


Figura 4.96: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 2, en estos casos la presión experiemntal es mayor a la numérica.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

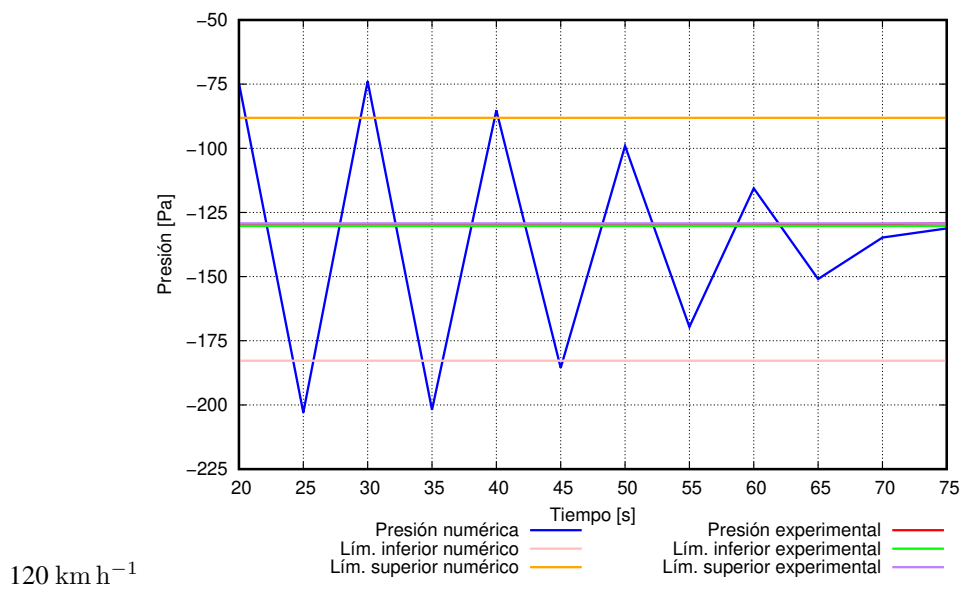
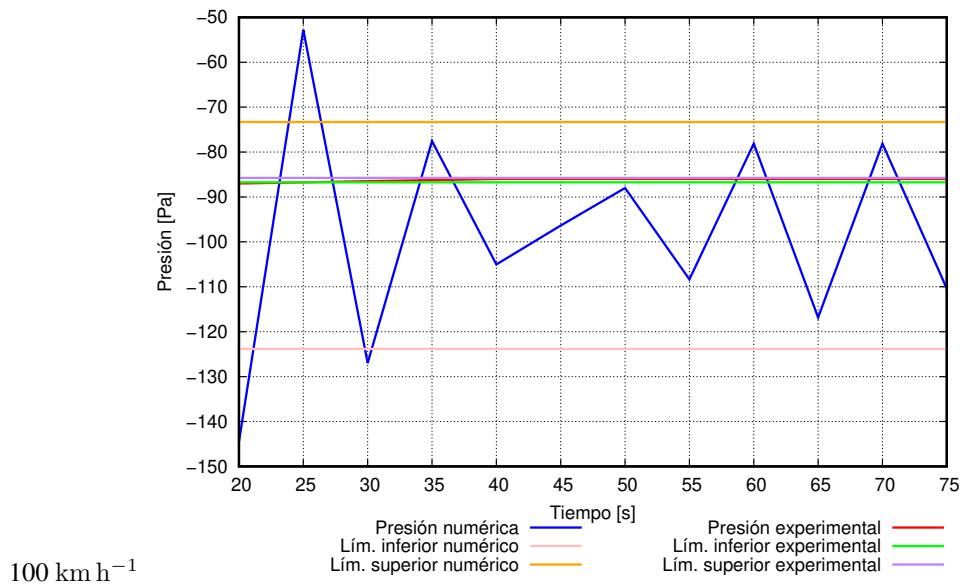
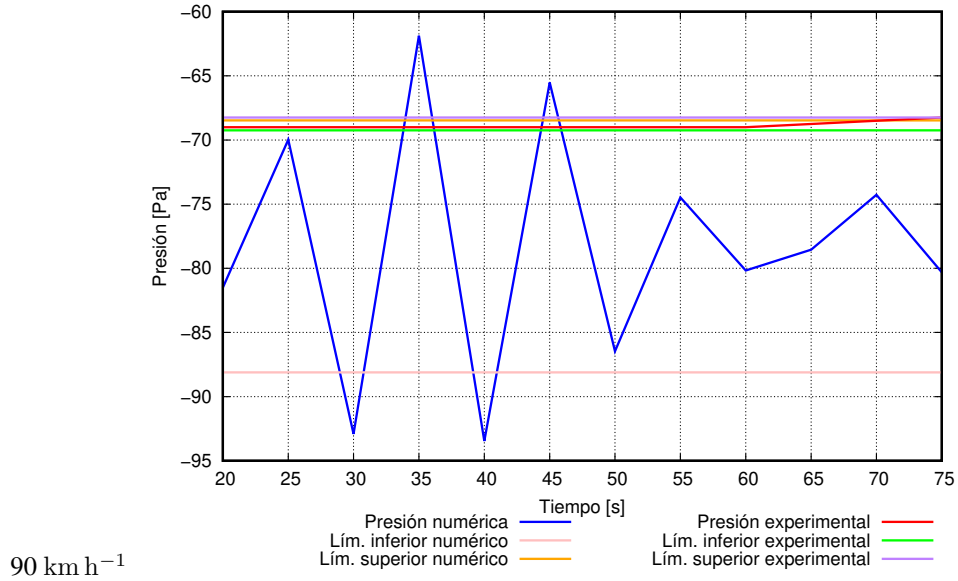


Figura 4.97: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 3, las curvas de la presión experimental y numérica se solapan en los tres casos, estos datos corresponden en la parte posterior del autobús.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

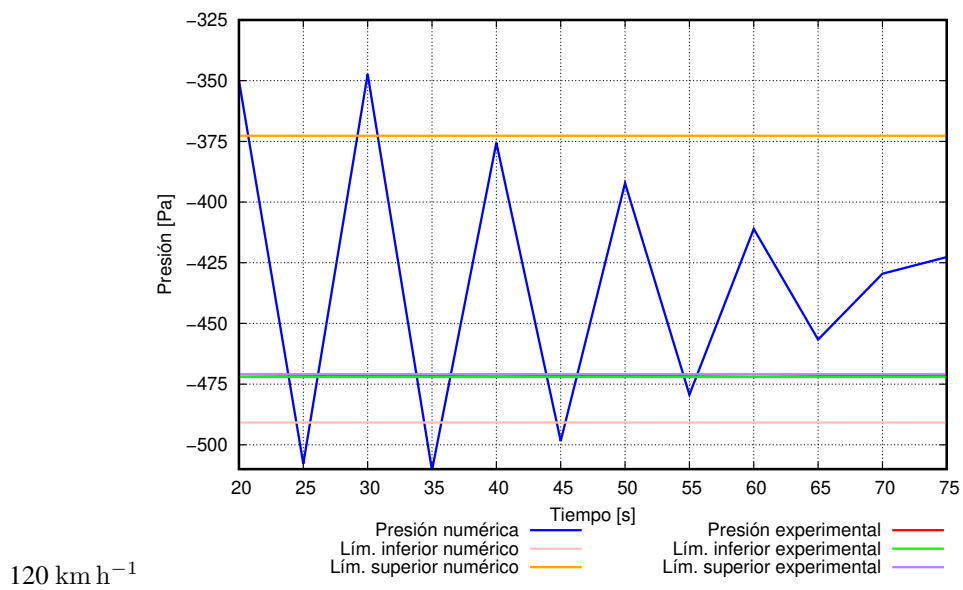
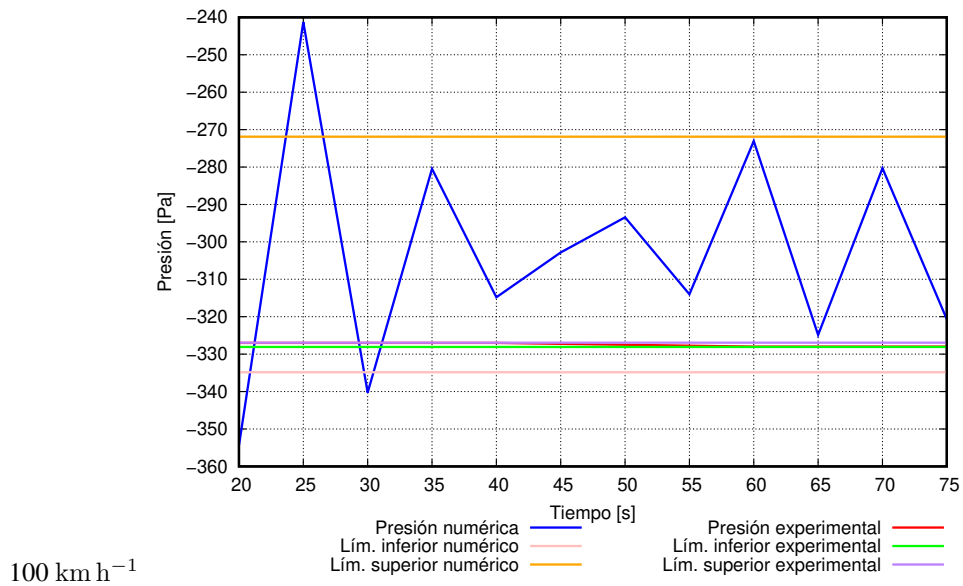
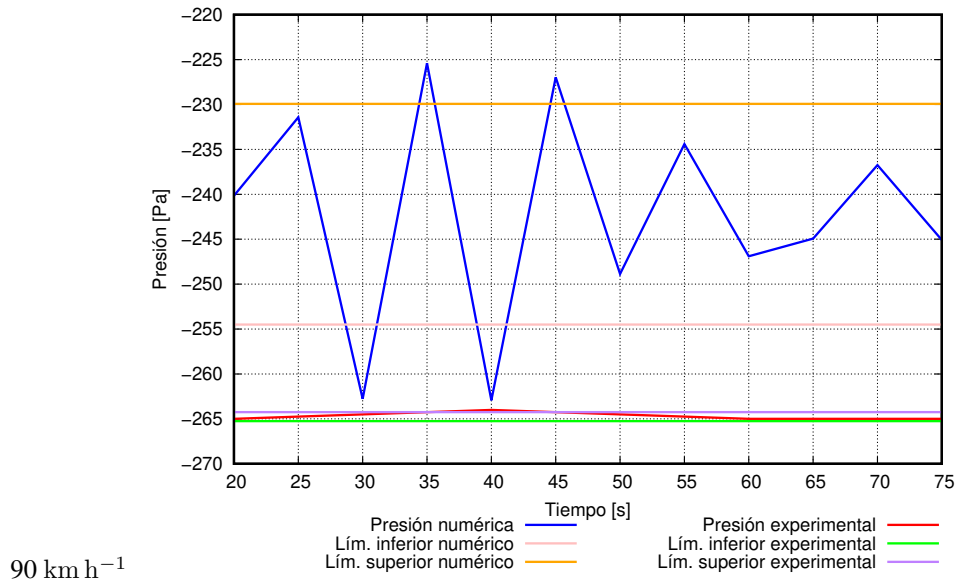


Figura 4.98: Las figuras, muestran la presión en el punto 5, en estos casos la presión numérica es mayor a la experimental, sin embargo se solapan en las tres velocidades.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

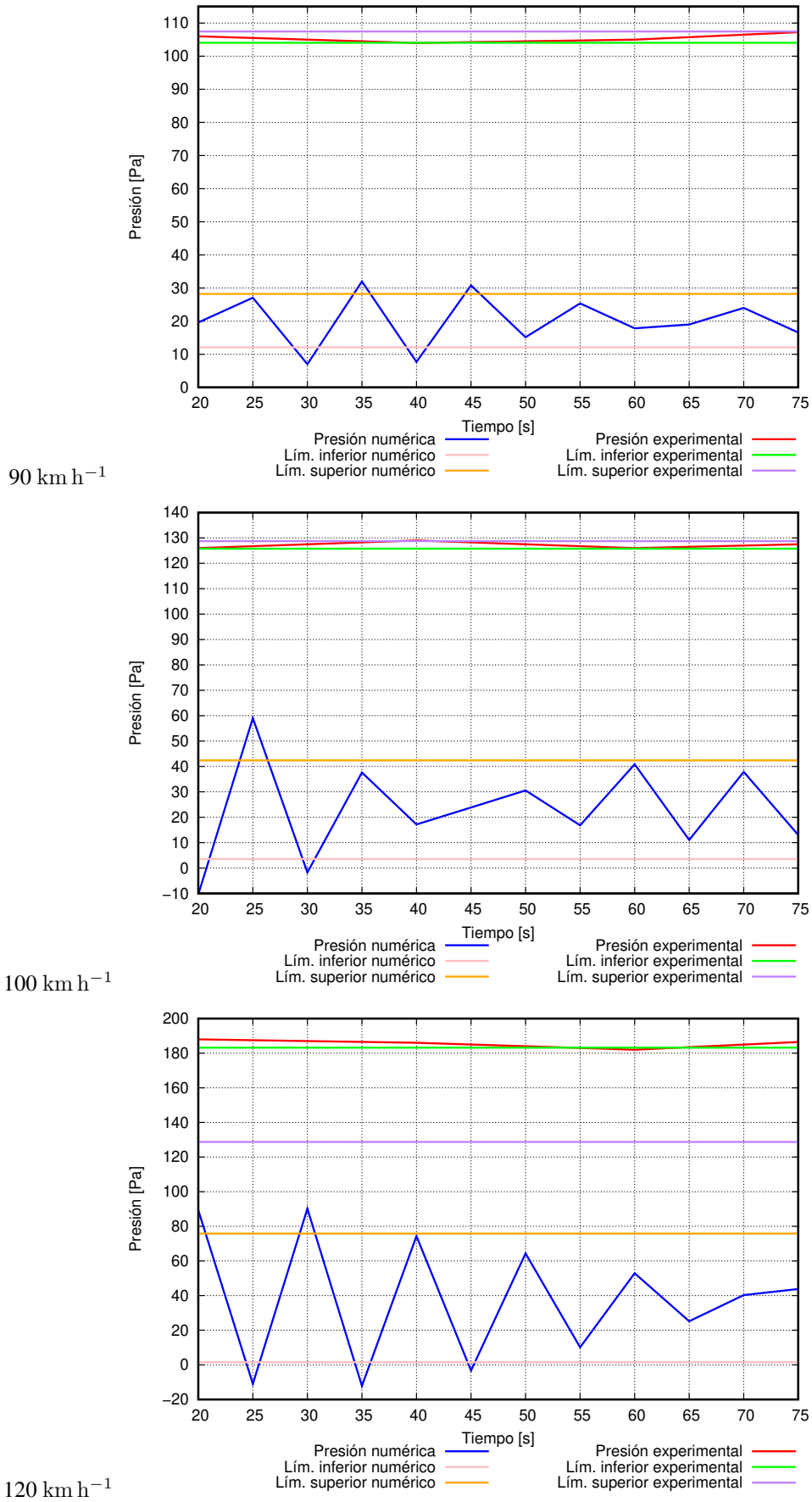


Figura 4.99: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 5, teniendo una amplia diferencia significativa para los datos numéricos y experimentales.

Fuente: Los Autores

A continuación las figuras muestran la diferencia entre los resultados numéricos y experimentales para las variables de velocidad y presión en el modelo 1 con modificaciones y con llantas a diferentes velocidades.

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

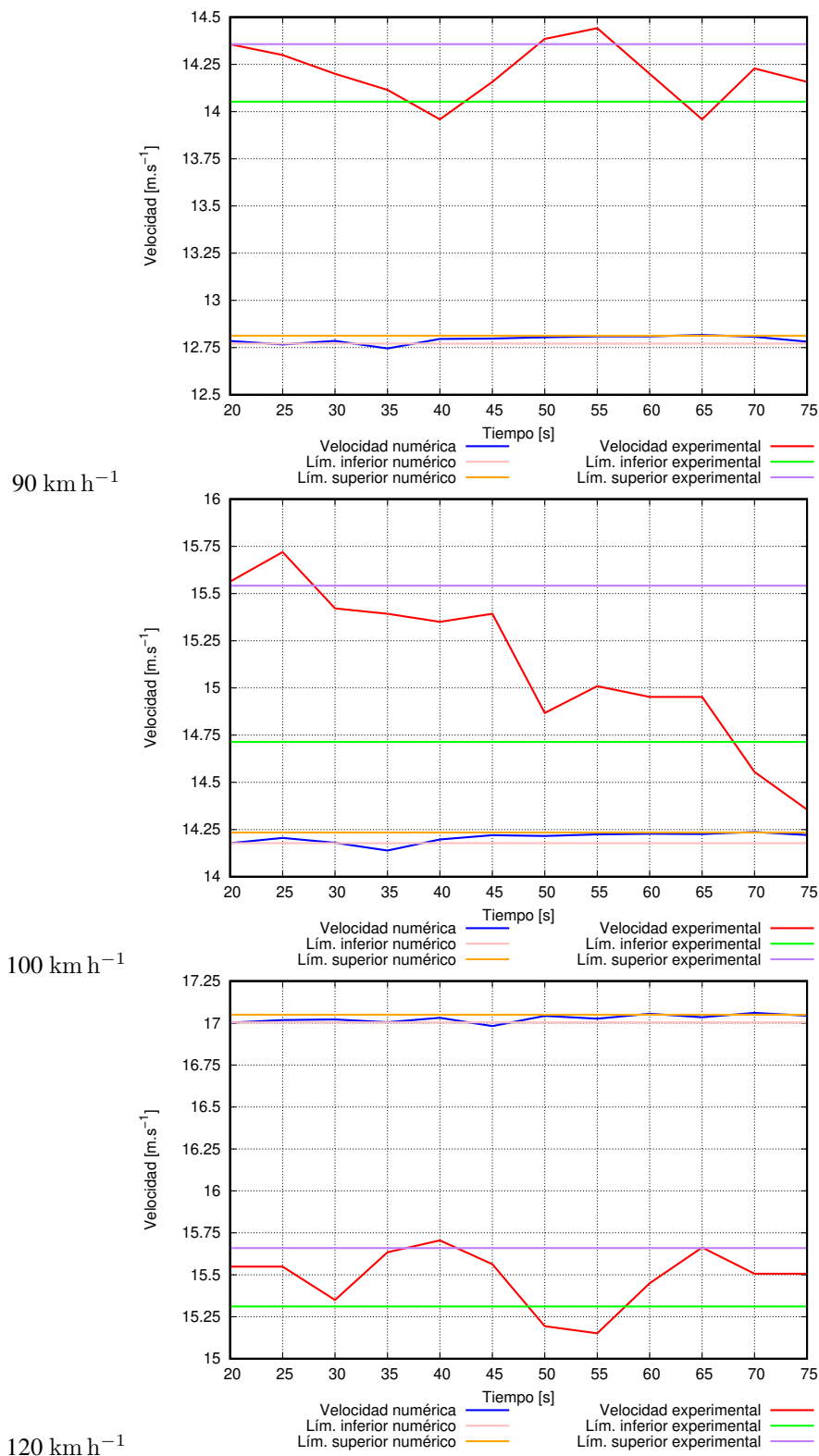


Figura 4.100: Las figuras, muestran la velocidad en el punto 1, la velocidad experimental es superior a la numérica en dos casos, mientras cuando la velocidad es 120 km h^{-1} , la velocidad numérica es mayor a la experimental por aproximadamente 2 m s^{-1} .

Fuente: Los Autores

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

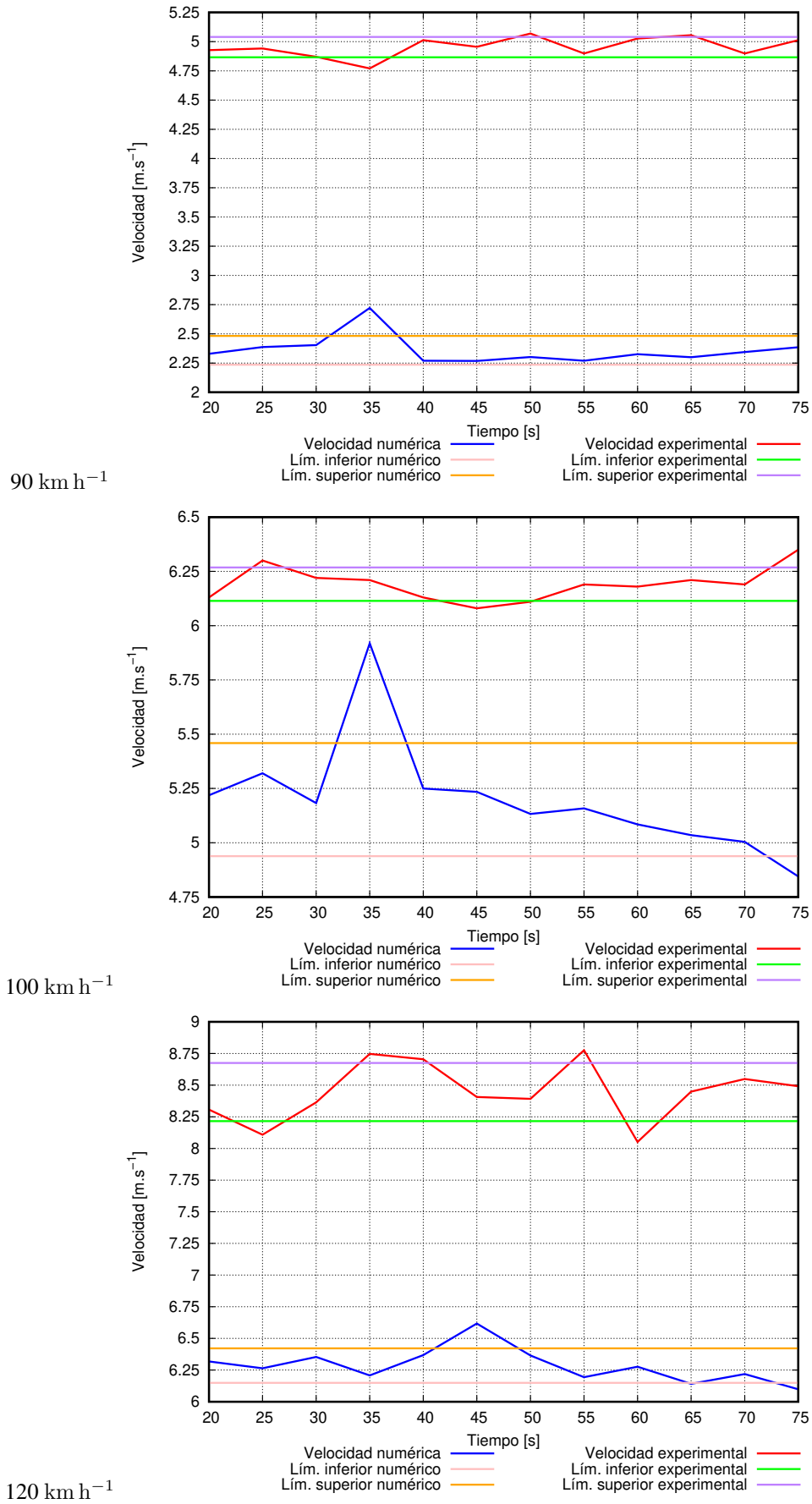


Figura 4.101: Las figuras, muestran la velocidad en el punto 3, los valores experimentales son superiores a los numéricos, sin embargo, para la velocidad 100 km h^{-1} la diferencia se acorta casi solapándose.

Fuente: Los Autores

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

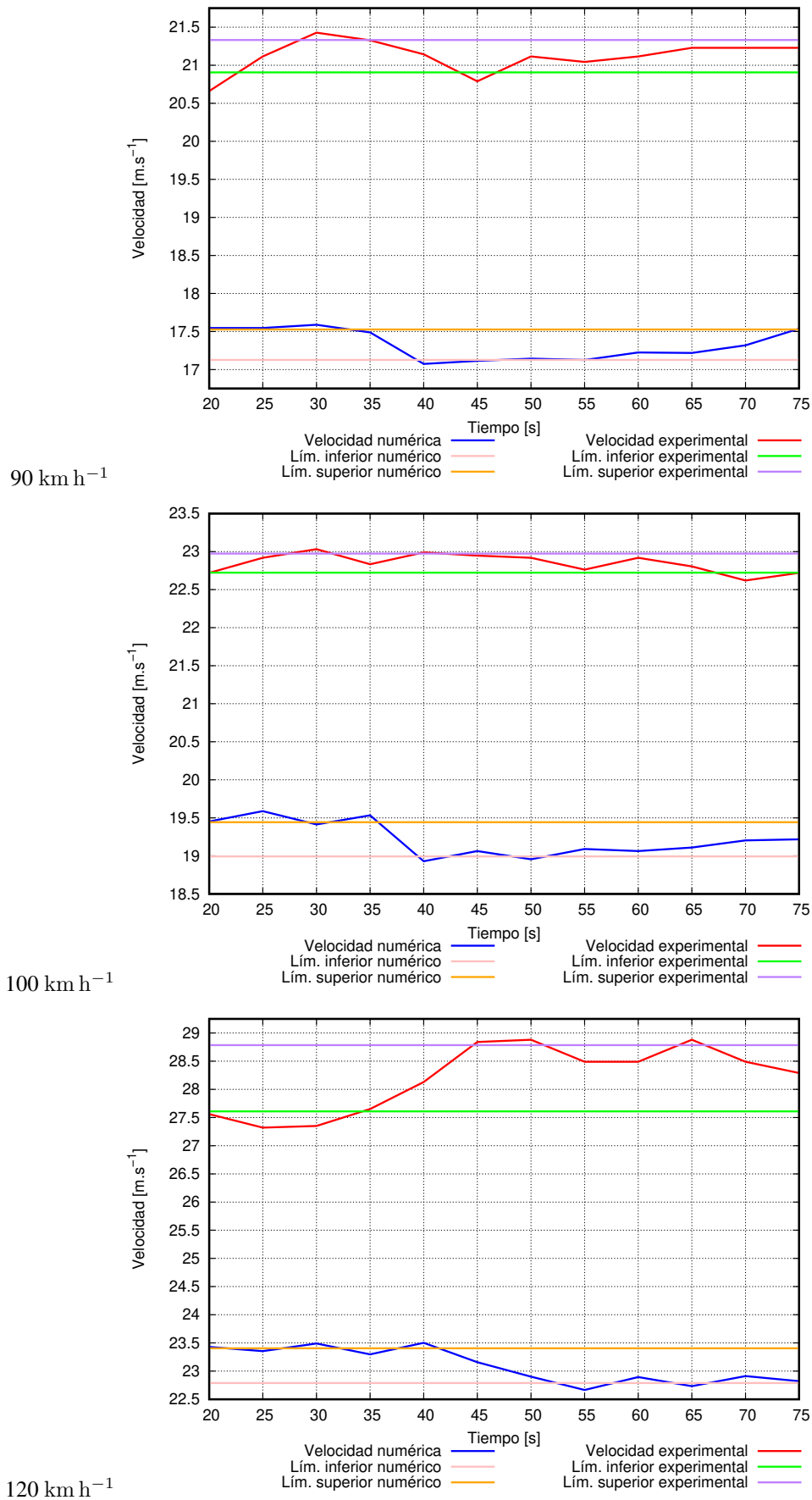


Figura 4.102: Las figuras, muestran las velocidades en el punto 4, la velocidad experimental es mayor a la numérica, sin embargo la diferencia entre ellas es aproximadamente $3,5 \text{ m s}^{-1}$ para los tres casos.

Fuente: Los Autores

Velocidad [m s^{-1}] vs Tiempo [s]

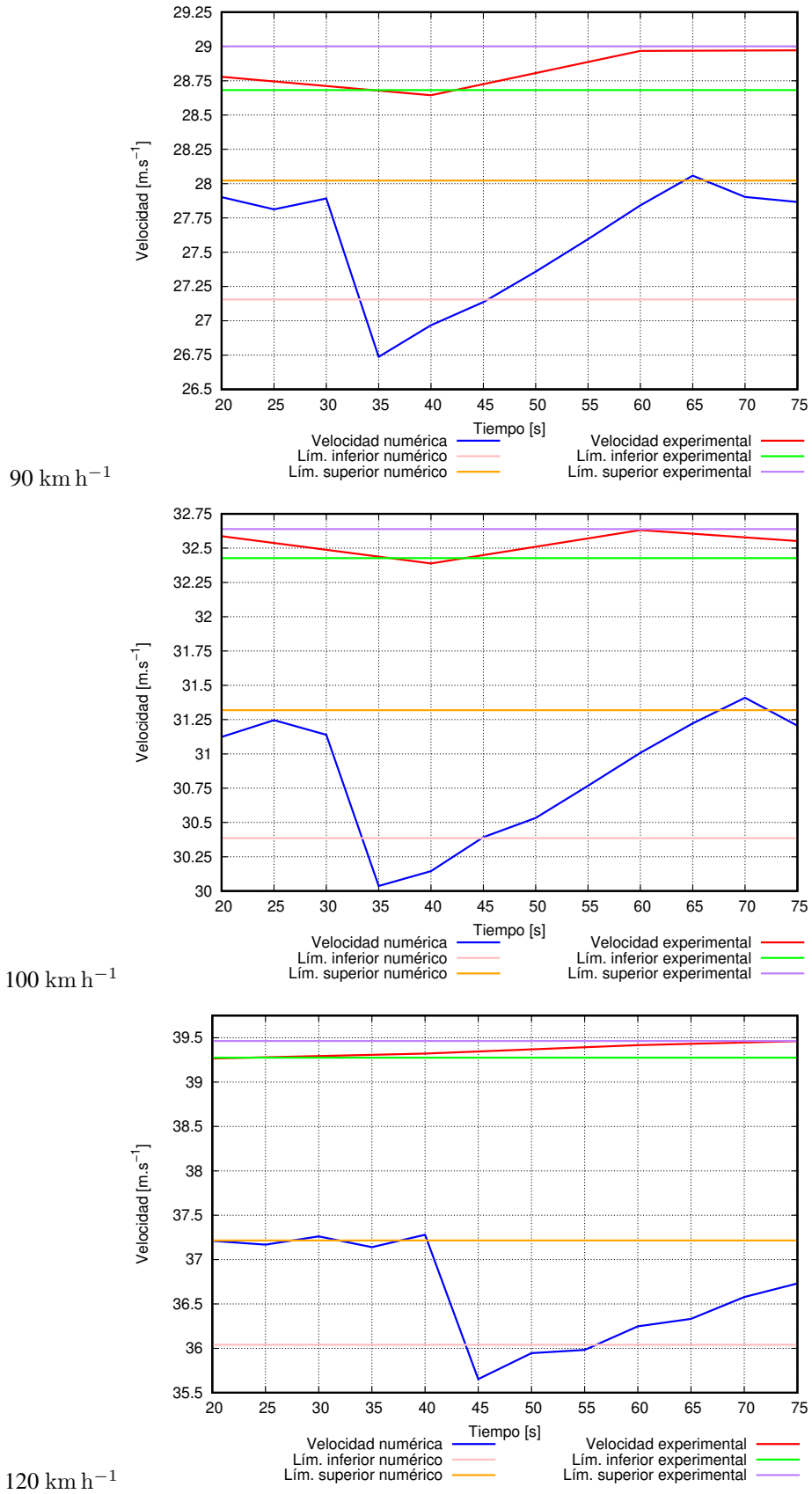
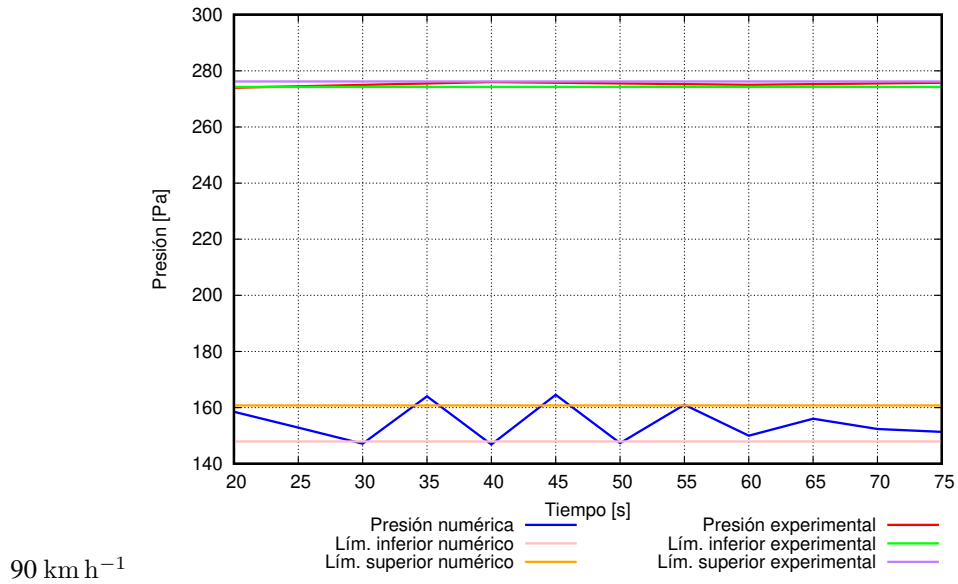


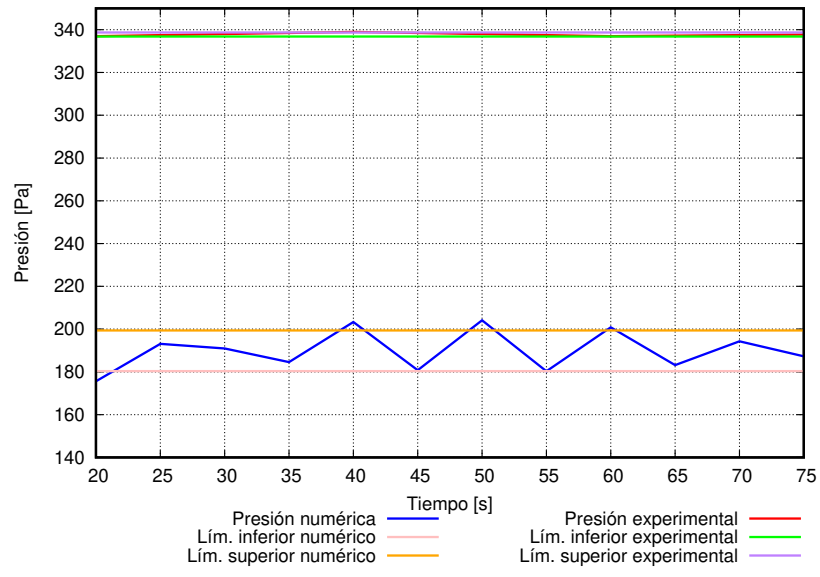
Figura 4.103: Las figuras, muestran las velocidades en el punto 7, en ninguno de los casos las curvas se solapan, sin embargo es algo curioso el comportamiento que tiene la curva de la velocidad numérica, al ser menor a la experimental.

Fuente: Los Autores

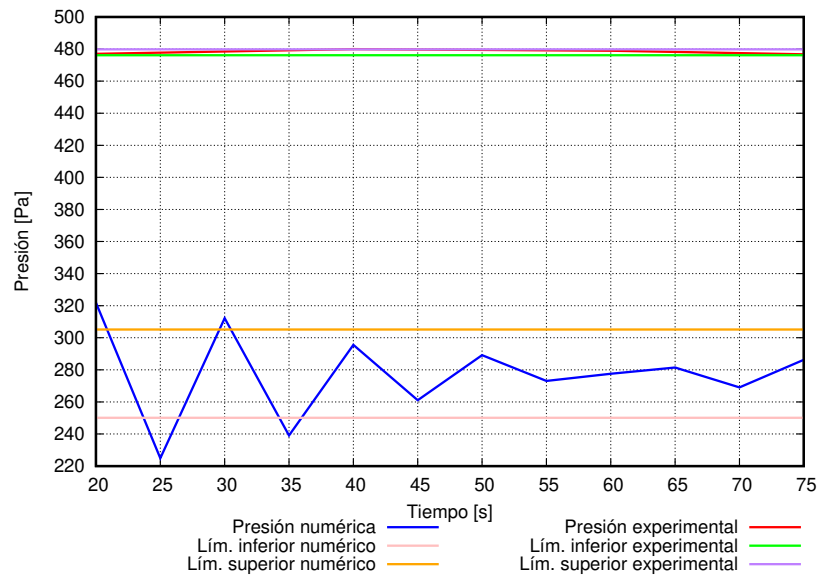
Presión [Pa] vs Tiempo [s]



90 km h⁻¹



100 km h⁻¹



120 km h⁻¹

Figura 4.104: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 1, sin embargo las curvas de numéricas y experimentales no se solapan por la gran diferencia que presentan.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

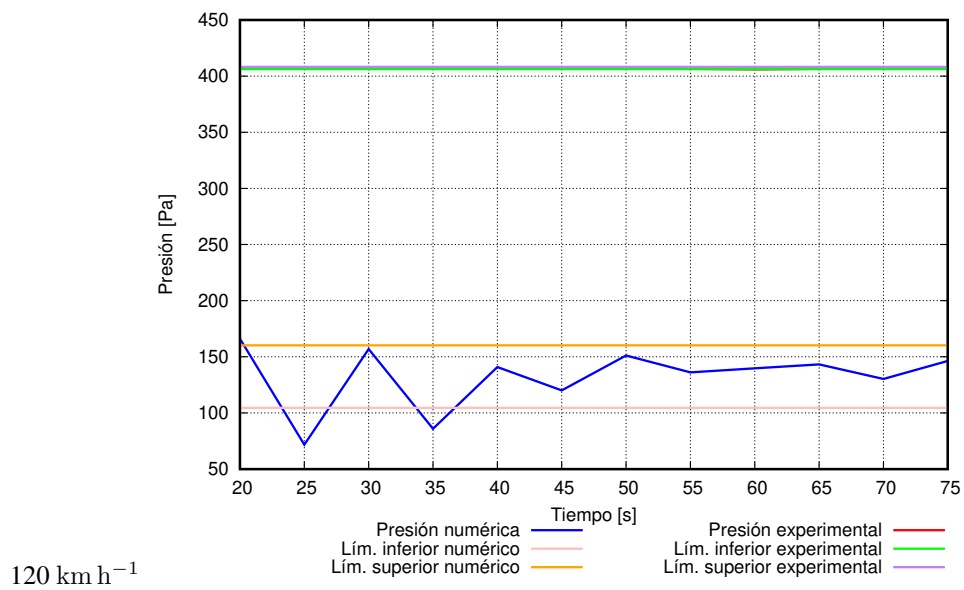
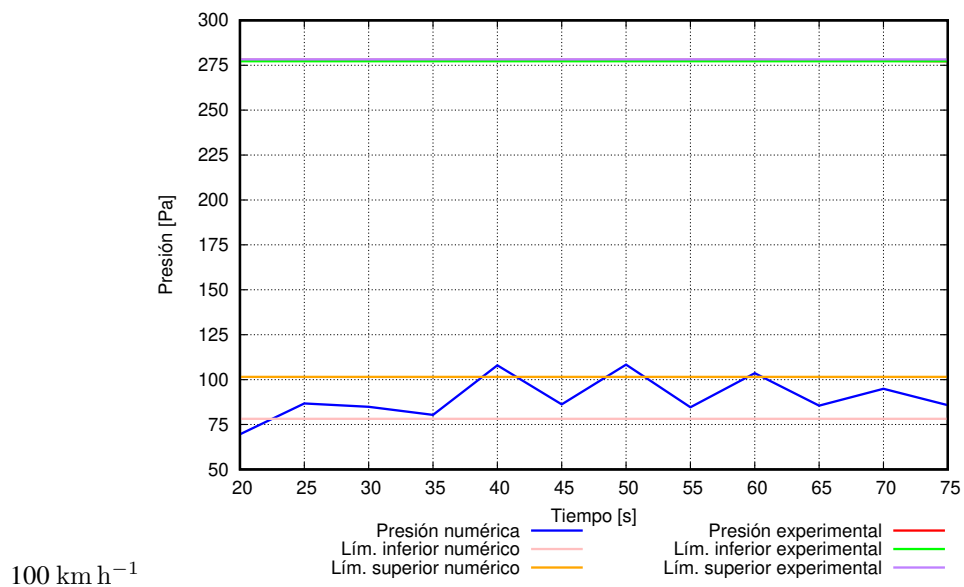
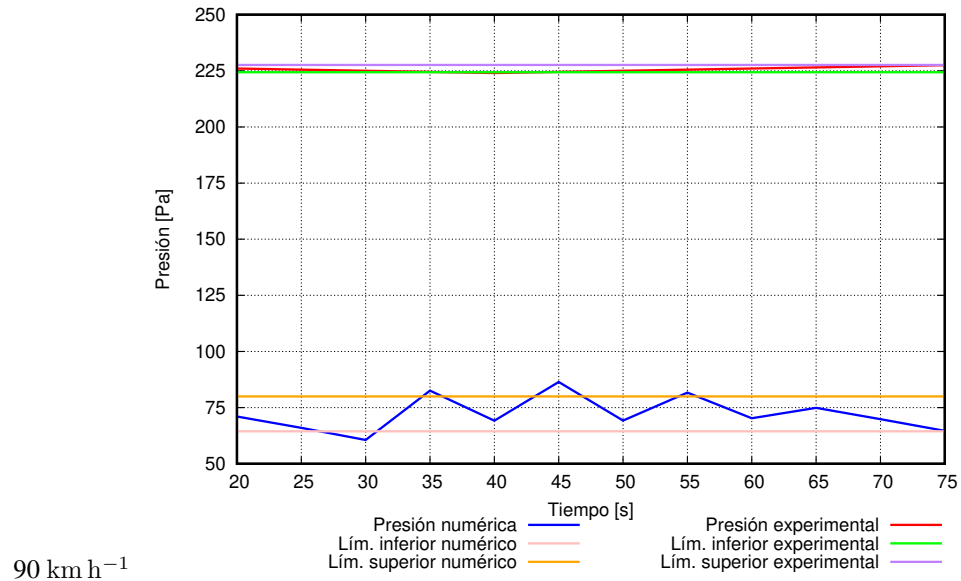


Figura 4.105: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 2, en estos casos la presión experiemntal es mayor a la numérica.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

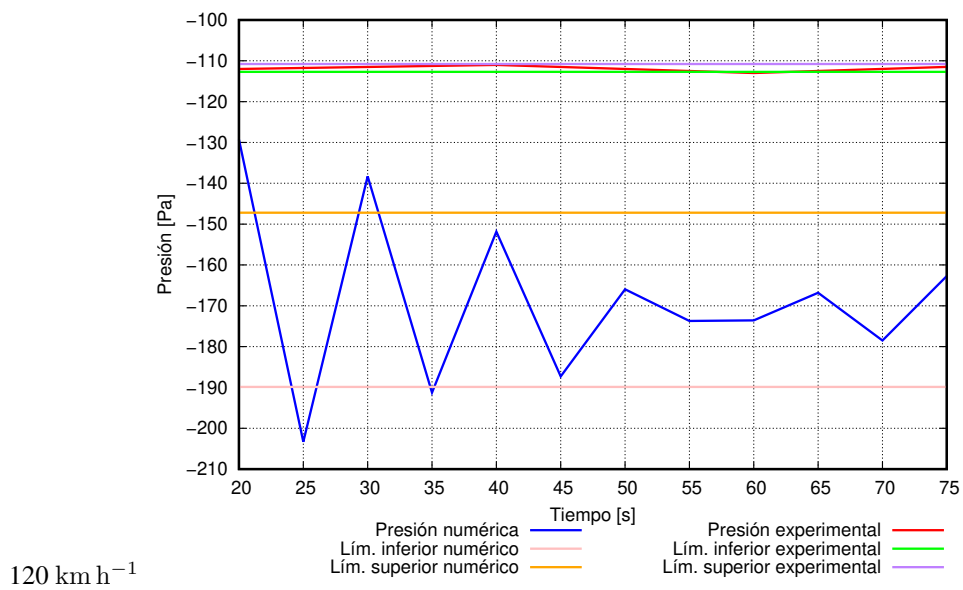
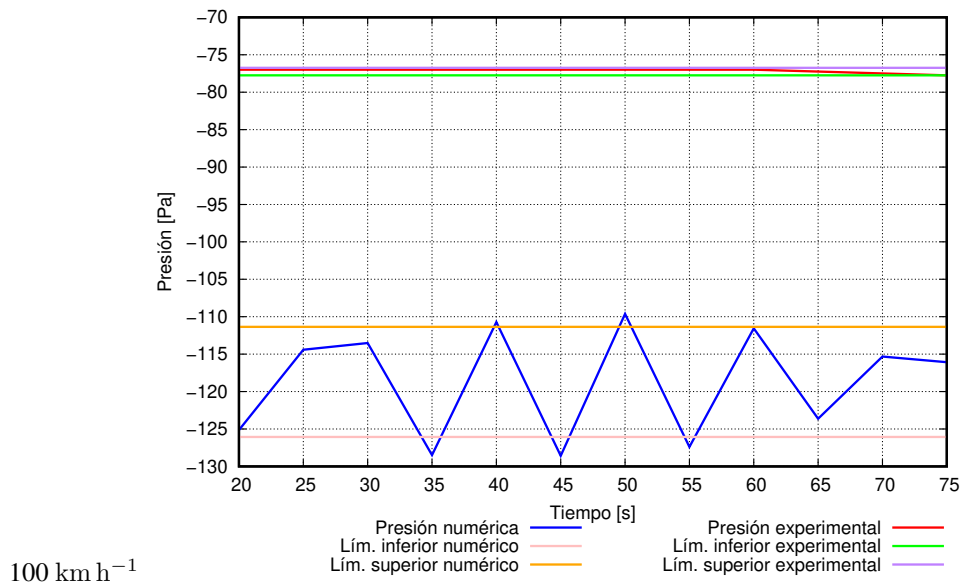
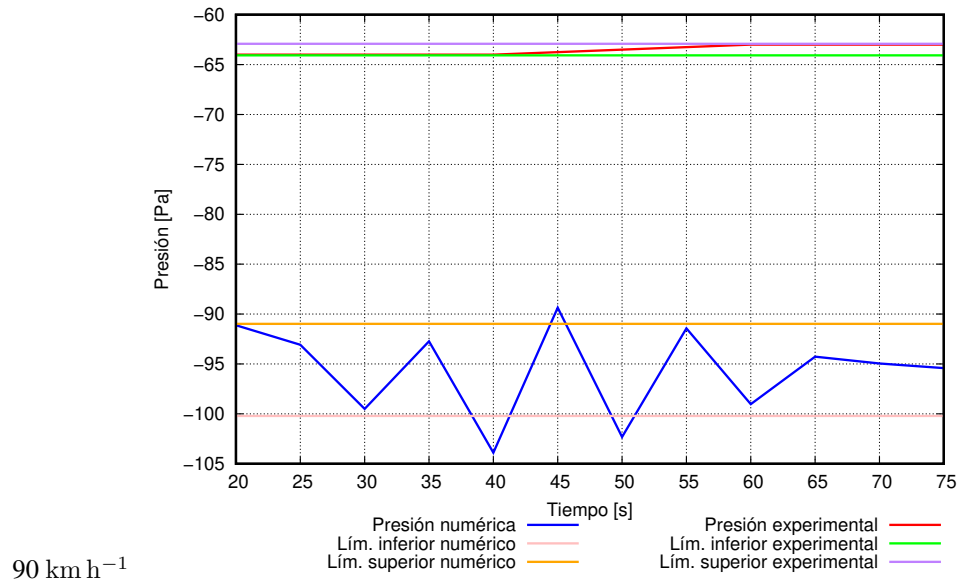


Figura 4.106: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 3, las curvas de presión en ninguno de los casos se solapan manteniendo la diferencia entre ellas como en los anteriores casos.

Fuente: Los Autores

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

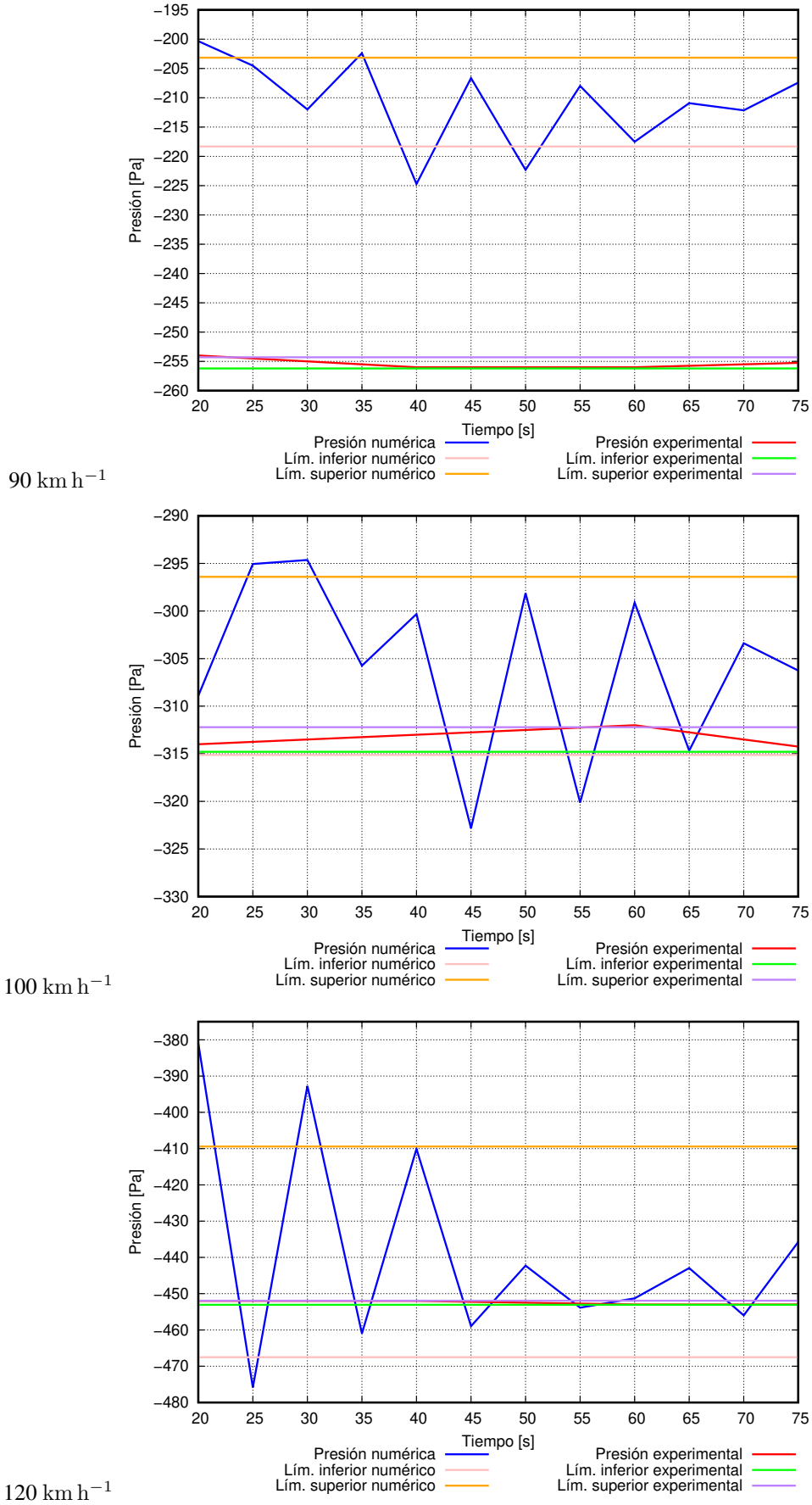


Figura 4.107: Las figuras, muestran la presión en el punto 5, en estos casos las curvas de presión llegan a solaparse a velocidades de 100 km h⁻¹ y 120 km h⁻¹, para todos los casos se observa la presión numérica mayor a la experimental.

Presión [Pa] vs Tiempo [s]

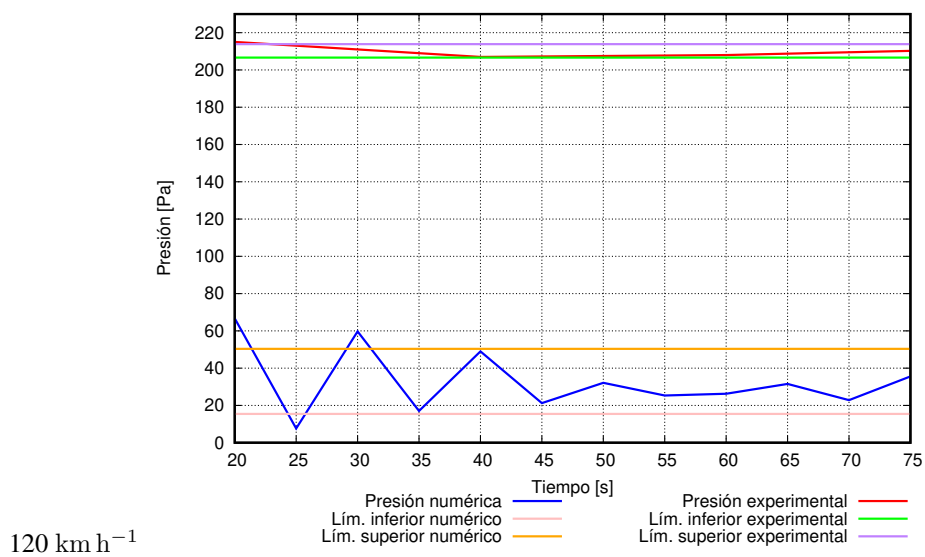
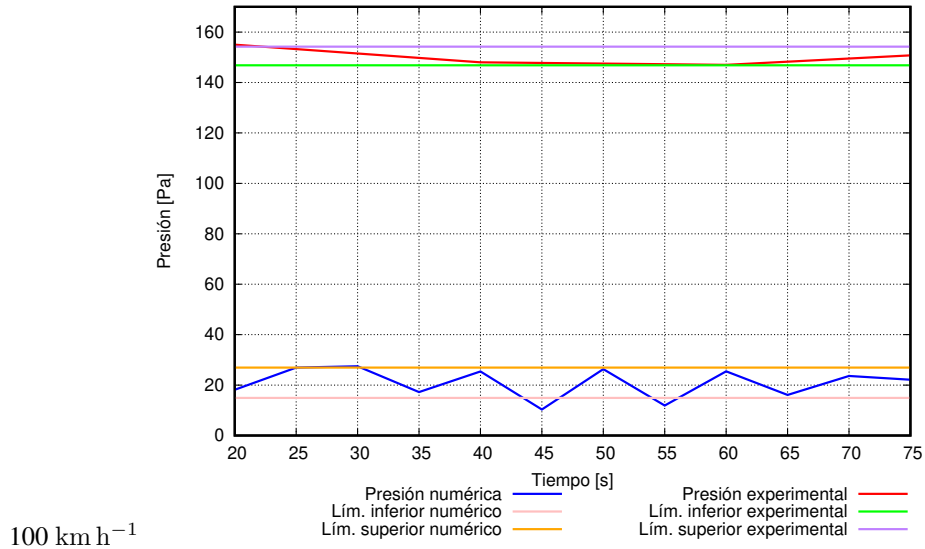
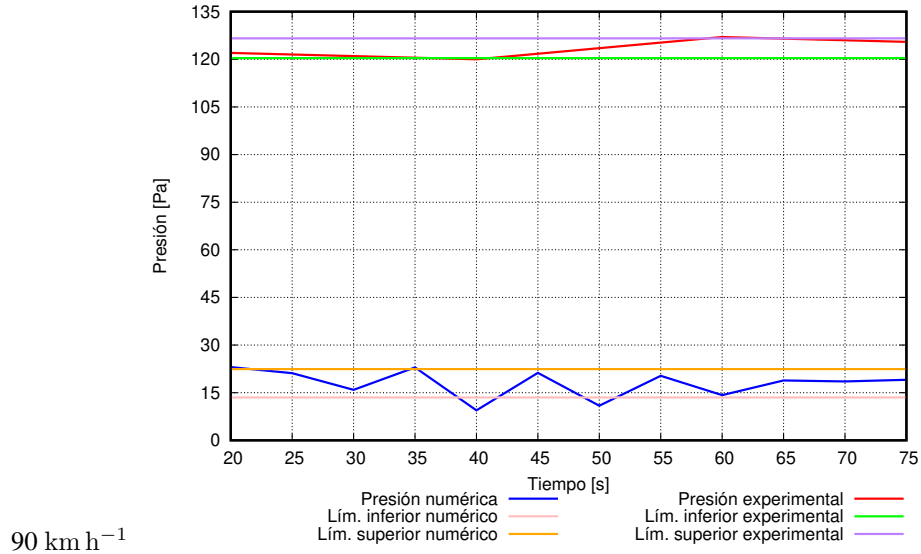


Figura 4.108: Las figuras, muestran la presión en función del tiempo en el punto 5, teniendo una amplia diferencia significativa para los datos numéricos y experimentales.

Fuente: Los Autores

CAPÍTULO V

El estudio aerodinámico de las carrocerías de autobuses finaliza con este capítulo donde se plasman las ideas relevantes del trabajo, y tiene como fin sintetizar los subtemas abordados en el estudio.

5. CONCLUSIONES

- El uso de dominios computacionales en 2D nos permitió simplificar el problema carrocería-viento, ahorrando recursos computacionales tanto de procesamiento como de almacenamiento de información.
- La diferencia significativa de la calle de vórtices de Von Karman con número de Reynolds de 150, entre el número de Strouhal teórico [45] y el numérico es 1,78 % para el modelo de calibración 4 y con el método de interpolación de segundo orden. Esto se debe a las características del flujo y al paso de tiempo entre las iteraciones.
- El análisis de autoconvergencia numérica realizado con los modelos de calibración nos permitió determinar cuan refinado debe estar el mallado o tamaño de las celdas dentro de un volumen de control, para capturar inestabilidades de escala pequeña en el flujo, asociadas a procesos de generación de vórtices. En este contexto, realizar un refinamiento de la malla alrededor de la geometría de prueba también facilitó la convergencia de los resultados. Esto está demostrado en la tabla 4.17, donde al trabajar con 72900 celdas los resultados tuvieron una desviación estándar de 0,0096 siendo 42,85 % menor a la conseguida con 8200 celdas.
- El comportamiento aerodinámico de los modelos de estudio evolucionan generando una zona de alta presión en el área frontal de los modelos, esto ocurre porque el flujo de aire choca con la sección transversal, mientras en la parte posterior del autobús se generan zonas de baja presión. La diferencia de presión genera un gradiente de presión adverso que realiza un trabajo negativo que eventualmente haría que el autobús se detenga.
- El comportamiento que tienen los modelos idealizados y modelos geométricos de autobuses nos permitió estudiar el comportamiento de flujo alrededor de una geometría. Para el modelo idealizado que consistía en un rectángulo sin redondeos en sus vértices el coeficiente de dragado fue mayor en los demás con un valor de 1,3093. En su lugar, el modelo rectangular con redondeos en sus vértices presentó el menor coeficiente de dragado de 0,7349. Sin embargo, cuando se comparan los modelos geométricos de los autobuses el modelo 2 presenta menor coeficiente de dragado que el modelo 1, con una variación del 7 % como se detalla en la tabla 4.22. Por ende la fuerza de dragado es menor en el modelo con bordes redondeados.
- El incremento secuencial de las velocidades de análisis para los modelos 1 y 2 permitieron comprender el comportamiento de los mismos cuando aceleran en carreteras. Encontramos que mientras más velocidad

adquiera el flujo la generación de vórtices en la parte posterior se incrementa teniendo así un incremento del coeficiente de dragado de 0,9202 que representa el 5,29 % (M1), y el valor del coeficiente de dragado de 0,8382 que representa el 3,40 % (M2) al pasar de 90 km h^{-1} a 100 km h^{-1} , mientras que cuando se incrementa a los 120 km h^{-1} , el coeficiente de dragado tiene un incremento de 0,9520 que es el 10,12 % (M1) y un valor de 0,8785 que es el 8,25 % (M2) con respecto al obtenido a los 90 km h^{-1} . El modelo 2 mantiene un C_d menor al modelo 1.

- Desde le punto de vista físico y numérico la vorticidad depende de la velocidad de flujo. Nuestros resultados confirman que a mayor velocidad de flujo mayor presencia de vórtices.
- La conclusión principal de nuestro análisis numérico de carrocerías es que el modelo 2 de autobús presenta una fuerza de dragado de 35 % menor que en el modelo 1 para el modelo sin llantas. Por ende el modelo 2 tiene mejores propiedades aerodinámicas.
- El análisis numérico de los modelos geométricos de autobuses sin considerar esquemas de turbulencia, revela que existen desprendimientos de flujo en la parte posterior de los modelos 1 y 2, pues al resolver las ecuaciones de Navier-Stokes el software no considera los términos de energía turbulenta y difusividad que se pueden presentar en el dominio computacional. Esto se observa en las figuras 4.27 y 4.3 para el modelo 1, y en las figuras 4.29 y 4.4.2.2 para el modelo 2.
- La inclusión de esquemas de turbulencia $\kappa - \epsilon$ permiten inducir a una laminaridad y estabilidad del flujo, y permiten capturar de mejor forma los resultados de las soluciones numéricas.
- Un contraste del modelo 1, con y sin modificaciones, el modelo modificado tiene un coeficiente de dragado menor que el original en un 30 %. Esto implica el modelo modificado es más estable debido a que la fuerza de sustentación es mayor que en el modelo original, representada por una fuerza de signo negativo. Es decir, en la dirección paralela al peso del autobús.
- Para el modelo 2 original y el modificado sin llantas, las modificaciones realizadas a los modelos no fueron las adecuadas ya que el coeficiente de dragado aumenta en el modificado a relación con el original, en un 4 % siendo desfavorable para nuestros objetivos y no habría ningún ahorro en el gasto de combustible, de la mano va la fuerza de sustentación que hace menos estable.
- Al contrastar el modelo 1 considerando llantas, el modelo modificado adquiere mayor coeficiente de dragado, este aumento representa el 12,5 %, pese a que el modelo gastaría más combustible la ventaja de la modificación es estable debido a la fuerza que está en dirección paralela a la gravedad siendo favorable en las curvas y a altas velocidades.
- Al comparar el coeficiente de dragado que el fabricante proporciona para el modelo 2, que es $C_d = 0,42$, con el coeficiente de dragado que obtenemos en nuestro estudio 2D para este modelo, que es $C_d = 0,48$,

encontramos una diferencia del 12,5 %. Esto confirma con el porcentaje señalado lo reportado por el fabricante, y a la vez, valida nuestro estudio.

- La estimación del consumo energético (combustible) realizada en base al C_d nos permite comparar con el consumo de combustible real, teniendo una diferencia del 5,37 %, mientras al comparar con un valor teórico la diferencia tiene un orden de 7,64 %, para una velocidad de 90 km h^{-1} .
- El análisis de la frecuencia de desprendimiento experimental fue hallada analizando la interacción a través de una técnica de visualización de flujo que involucra cuerdas de lana. Esto nos permitió realizar una comparación con la frecuencia calculada numéricamente que se llevo a cabo con parámetros como longitud característica, número de Reynolds y velocidad de flujo el resultado fue una diferencia del 56 %. Esto se debió a varias factores por ejemplo: como la resolución de la cámara no permitió captar de mejor forma las oscilaciones de las cuerdas, y que se realizó el estudio con modelos a escala afectando en la visualización del comportamiento de la cuerda.
- La diferencia del coeficiente de dragado numérico y experimental para el modelo 1 sin modificaciones es de 6,50 %, y la diferencia del coeficiente de sustentación es de 80 %. Atribuimos ésta diferencia al control del entorno, a la precisión de los instrumentos de medición, y al montaje de los sensores en la cámara de viento.
- La diferencia del coeficiente de dragado numérico y experimental para el modelo 1 modificado es $\sim 20 \%$, y la diferencia del coeficiente de sustentación es $\sim 35 \%$ para las diferentes velocidades ensayadas.
- El coeficiente de dragado entre los ensayos numéricos y los experimentales realizados para el modelo 2 sin modificaciones presentan una diferencia de $\sim 25 \%$, mientras la diferencia del coeficiente de sustentación es $\sim 110 \%$.
- El modelo 2 modificado presenta una diferencia de $\sim 30 \%$ en el coeficiente de dragado entre los ensayos numéricos y los experimentales, y el coeficiente de sustentación una diferencia de $\sim 6 \%$.
- La comparación de las variables de presión y velocidad entre el métodos numérico y experimental, contrasta una diferencia en la presión de 100 Pa aproximadamente y una diferencia de velocidad de $\sim 3 \text{ m s}^{-1}$. Esto implica que la diferencia global es mayor al 50 % y se debe a factores como: el control del entorno, al montaje de sensores en la cámara de ensayos, y a la precisión de los instrumentos de medición usados al realizar los ensayos.

6. RECOMENDACIONES

- Conseguir un mayor refinamiento de la grilla o mallado para capturar inestabilidades en el flujo a longitudes de onda más pequeñas. Esto permitiría que futuras simulaciones numéricas tengan una mejor convergencia numérica.
- La malla de los modelos deberá ser uniforme, alrededor del perfil de los autobuses sin que exista un cruce entre celdas, para no tener alteraciones en los resultados.
- Se debería tomar en cuenta un estudio en 3D si las posibilidades computacionales lo permite para contrastar con los resultados presentados en este trabajo, ya que ahí se tiene en cuenta el cambio de secciones debido a que el flujo recorre por el modelo en 3D.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agencia Nacional de Tránsito. Estadísticas de transporte terrestre y seguridad vial. <https://www.ant.gob.ec/index.php/noticias/estadisticas>, 2017.
- [2] Álvaro Javier Andrade Terán. Análisis de la industria metalmecánica Carrocera de Ecuador durante el período 2006-2013. B.S. thesis, PUCE, 2016.
- [3] Ramirez Christian Barrera Juan, Maldonado Diego. Análisis aerodinámico de un vehículo urbano mediante dinámica de fluidos computacionales aplicado a la competencia de SHELL ECO MARATHON. B.S. thesis, Universidad de San Buenaventura. Carrera de Ingeniería Aeronáutica., 2014.
- [4] Jaime Fernando Benalcázar Venegas. Diseño y construcción de un túnel de viento cerrado para calibración de sensores e instrumentos de medición del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). B.S. thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Mecatrónica., 2015.
- [5] W. Benenson, J.W. Harris, H. Stócker, and H. Lutz. *Handbook of Physics*. Handbook of Physics. Springer New York, 2006.
- [6] Richard Evelyn Donohue Bishop and AY Hassan. The lift and drag forces on a circular cylinder in a flowing fluid. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 277(1368):32–50, 1964.
- [7] Moisés Blanco Espinar. Efecto de la interacción en la resistencia aerodinámica de la estela de cuerpos romos. *Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Aeroespacial (pp. 57)*, 2015.
- [8] Hank Childs, Eric Brugger, Brad Whitlock, Jeremy Meredith, Sean Ahern, David Pugmire, Kathleen Biagas, Mark Miller, Cyrus Harrison, Gunther H. Weber, Hari Krishnan, Thomas Fogal, Allen Sanderson, Christoph Garth, E. Wes Bethel, David Camp, Oliver Rübel, Marc Durant, Jean M. Favre, and Paul Navrátil. VisIt: An End-User Tool For Visualizing and Analyzing Very Large Data. In *High Performance Visualization—Enabling Extreme-Scale Scientific Insight*, pages 357–372. Oct 2012.
- [9] Cámara Nacional de Fabricantes de Carrocerías. Fabricación de buses, el transporte y movilidad humana. <http://canfacecuador.com/>, 2016.
- [10] Agencia Nacional de Tránsito. Homologación vehicular. <https://bit.ly/2mddCcS>, 2018. En línea; Último Acceso 3 Marzo 2018.
- [11] Joel H Ferziger and Milovan Peric. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media, 2012.

- [12] Ansys Fluent. 12.0 users guide. *Ansys Inc*, 2009.
- [13] Bengt Fornberg. A numerical study of steady viscous flow past a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 98(4):819–855, 1980.
- [14] B Fraija et al. Estudio de la aerodinámica en los vehículos. *PROSPECTIVA*, 4(2), 2006.
- [15] Ranald V Giles, Jack B Evett, and Cheng Liu. *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*, Serie de compendios Schaum, 1969.
- [16] Roland Glowinski, TW Pan, L Héctor Juárez, and E Dean. FINITE ELEMENT METHODS FOR THE NUMERICAL SIMULATION OF INCOMPRESSIBLE VISCOUS FLUID FLOW MODELED BY THE NAVIER-STOKES EQUATIONS. PART I. *Boletín SEMA*, (36), 2008.
- [17] ANUARIO DE ESTADÍSTICA DE TRANSPORTE EN 2016. Reporte técnico, Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censo, QUITO: Juan Larrea N15-36 y José Riofrío (Planta Central), 2017.
- [18] Alik Ismail-Zadeh and Paul Tackley. *Computational methods for geodynamics*. Cambridge University Press, 2010.
- [19] Julian David Jaramillo Diaz, Cardenas Bañol, Hector Alonso, Abbat Asesor Jimmick, et al. NÚMERO DE REYNOLDS. 2015. link.
- [20] Sinisa Krajnovic and Lars Davidson. Numerical study of the flow around a bus-shaped body. *Journal of Fluids Engineering*, 125(3):500–509, 2003.
- [21] T Lajos, L Preszler, and L Finta. Effect of moving ground simulation on the flow past bus models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 22(2-3):271–277, 1986.
- [22] David Lanas. Análisis y optimización de la aerodinámica de la carrocería de un autobús por medio de la utilización de un programa de diseño por análisis de elementos finitos (engineering fluid dynamics). B.S. thesis, LATACUNGA/ESPE/2007, 2007.
- [23] Brian Edward Launder and BI Sharma. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1(2):131–137, 1974.
- [24] S. Mafé and J. de la Rubia. *Manual de Física Estadística*. Educació (Valencia, Spain): Materials. UNIVERSIDAD DE VALÈNCIA, 1998.
- [25] Alan T McDonald and George M Palmer. Aerodynamic drag reduction of intercity buses. *SAE Transactions*, pages 4469–4484, 1980.

- [26] Alan T. McDonald and George M. Palmer. Aerodynamic Drag Reduction of Intercity Buses. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 11 1980.
- [27] Fredy Leonardo Morquecho Andrade. PROPUESTA DE DISEÑO TÉCNICO DE UN TÚNEL DE VIENTO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS EN MODELOS Y DISEÑO DE AUTOPARTES. 2017.
- [28] R.L. Mott and J.E. Brito. *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación, 2006.
- [29] Robert L Mott. *Mecánica de fluidos*. Pearson educación, 2006.
- [30] F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*. Fluid Mechanics and Its Applications. Springer International Publishing, 2015.
- [31] Alberto Muñoz Mejías. Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad. B.S. thesis, 2012.
- [32] A Muthuvel, MK Murthi, NP Sachin, Vinay M Koshy, S Sakthi, and E Selvakumar. Aerodynamic Exterior Body Design of Bus. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7):2453–7, 2013.
- [33] VEHICULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS INTRAREGIONAL, INTERPROVINCIAL E INTRAPROVINCIAL. Norma, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Baquerizo Moreno E8-29 y Av. 6 de Diciembre, 2014.
- [34] Spencer Peiró, Joaquimand Sherwin. *Finite Difference, Finite Element and Finite Volume Methods for Partial Differential Equations*, pages 2415–2446. Springer Netherlands, Dordrecht, 2005.
- [35] R.S. Pressman, R.O. Martín, and L.J. Aguilar. *Ingeniería del software: un enfoque práctico*. McGraw-Hill, 1999.
- [36] Arun Raveendran, SN Sridhara, D Rakesh, and SR Shankapal. Exterior styling of an intercity transport bus for improved aerodynamic performance. Technical report, SAE Technical Paper, 2009.
- [37] Ernesto Sandoval Garzón. Estudio aerodinámico de un avión de alta relación de aspectos usando CFD. 2017.
- [38] Ernesto Sandoval Garzón. Estudio aerodinámico de un avión de alta relación de aspectos usando CFD. 2017.
- [39] Jeff Henry Santamaría Bermeo, Calero Venegas, and Jannio Paúl. Análisis de las propiedades aerodinámicas, efecto suelo y su aplicación en vehículos convencionales específicamente en el Chevrolet Aveo sedán como forma para aumentar la seguridad activa. B.S. thesis, LATACUNGA/ESPE/2012, 2012.

- [40] SCANIA. Autobuses y autocares. <https://www.scania.com/es/es/home/products-and-services/buses-and-coaches.html>, 2016.
- [41] C.Sakthivel R.Tamilmaran B.Saravanan V.Kondusamy S.Gowtham Raj, S.Mahesh Kumar. Analysis on Bus Body Aerodynamics Fuel Efficiency in City Buses. *IJESC*, 2016.
- [42] D Shiels, A Leonard, and A Roshko. Flow-induced vibration of a circular cylinder at limiting structural parameters. *Journal of Fluids and Structures*, 15(1):3–21, 2001.
- [43] Alexander J Smits. Mecánica de fluidos. *Una introducción física.*, Editorial Alfaomega, México, 2003.
- [44] Victor L Streeter, E Benjamin Wylie, Keith W Bedford, Juan G Saldarriaga, et al. *Mecánica de los fluidos*, volume 9. McGraw-Hill, 1988.
- [45] An-Bang Wang, Zdenek Trávníček, and Kai-Chien Chia. On the relationship of effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder. *Physics of Fluids*, 12(6):1401–1410, 2000.
- [46] Wikipedia. Conceptos básicos de aerodinámica. <https://es.wikipedia.org>, 2017.
- [47] Thomas Williams, Colin Kelley, and many others. Gnuplot 4.6: an interactive plotting program . <http://gnuplot.sourceforge.net/>, April 2013.

7. ANEXOS

7.1. DERIVACIÓN DE LAS ECUACIONES DE EULER

A continuación derivamos la ecuación de Euler.

7.1.1. DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA MASA (CONSERVACIÓN DE CONTINUIDAD)

Para entender cómo deducir la ecuación de conservación de la masa, se toma una celda tridimensional de todo el dominio computacional. El flujo ingresa por la cara izquierda y sale por la cara derecha de la celda, asumiendo que la misma cantidad de flujo másico que entra, sale por la otra cara y el fluido es estacionario.

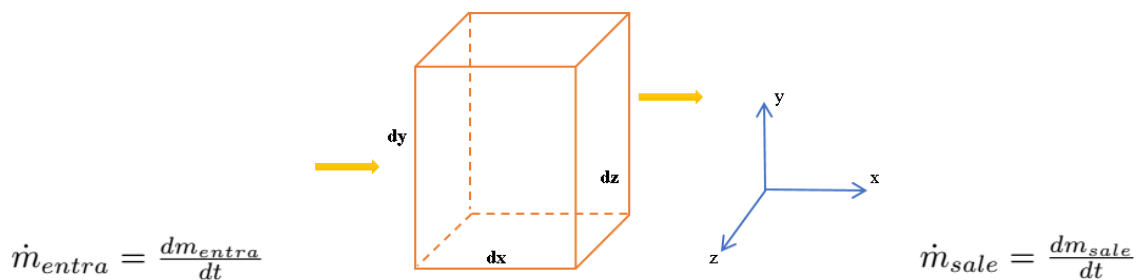


Figura 7.109: Conservación de masa

Fuente: Los Autores

La ecuación de conservación de masa en la celda sería:

$$\dot{m}_{sale} - \dot{m}_{entra} = -\frac{dm}{dt} \quad (7.1)$$

Donde:

$\frac{dm}{dt}$ = Flujo de masa que se demora en salir de una celda y pasar a otra.

Como sabemos por definición $\dot{m}_{entra} = \frac{dm_{entra}}{dt}$ y $\dot{m}_{sale} = \frac{dm_{sale}}{dt}$, la ecuación reescrita queda como:

$$\frac{dm_{sale}}{dt} - \frac{dm_{entra}}{dt} = -\frac{dm}{dt}$$

Se sabe que el flujo másico es $\dot{m} = \frac{m}{t}$, la densidad $\rho = \frac{m}{v}$, el volumen de la celda está dada por $v = A \cdot l$, el área de una cara de la celda es $A = dy \cdot dz$ y la longitud que atraviesa el flujo es $l = dx$, además dx, dy, dz son constantes:

$$\frac{m}{t} = \frac{\rho v}{t} = \rho \frac{dx}{dt} (dy \cdot dz) = \rho v_x \cdot dy \cdot dz$$

Considerando el movimiento del flujo másico en sentido positivo de los ejes x, y, z mostrados en la figura 7.109, se integra la ecuación anterior para cada uno de las variables x, y, z , para el flujo de entrada se tendría:

$$\rho v|_x dy \cdot dz + \rho v|_y dx \cdot dz + \rho v|_z dx \cdot dy = \dot{m}_{entra} \quad (7.2)$$

Mientras para el flujo másico que sale por las caras de la celda, considerando el desplazamiento en cada uno de los ejes x, y, z , la variación sería dx, dy, dz respectivamente, podemos escribir:

$$\rho v|_{x+dx} dy \cdot dz + \rho v|_{y+dy} dx \cdot dz + \rho v|_{z+dz} dx \cdot dy = \dot{m}_{sale} \quad (7.3)$$

Reemplazando las ecuación (7.2) y (7.3) en la ecuación (7.1) podemos escribir:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{entra} - \dot{m}_{sale} &= \frac{dm}{dt} \\ \rho v|_x dy \cdot dz + \rho v|_y dx \cdot dz + \rho v|_z dx \cdot dy - \rho v|_{x+dx} dy \cdot dz - \rho v|_{y+dy} dx \cdot dz - \rho v|_{z+dz} dx \cdot dy &= \frac{dm}{dt} \end{aligned}$$

Por definición se sabe que la masa es $m = \rho v$, reemplazando el volumen de la celda antes definido se tiene $m = \rho dx \cdot dy \cdot dz$. Además el flujo másico por definición es $\frac{\partial m}{\partial t}$, así podemos definir que $\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx \cdot dy \cdot dz$ esto considera el cambio de la densidad en el tiempo (derivada parcial) y agrupando en términos comunes tenemos:

$$\frac{(\rho v|_x - \rho v|_{x+dx}) dy \cdot dz + (\rho v|_y - \rho v|_{y+dy}) dx \cdot dz + (\rho v|_z - \rho v|_{z+dz}) dx \cdot dy}{dx \cdot dy \cdot dz} = \frac{d\rho}{dt}$$

Realizando la división entre los términos comunes tenemos:

$$\frac{\rho v|_x - \rho v|_{x+dx}}{dx} + \frac{\rho v|_y - \rho v|_{y+dy}}{dy} + \frac{\rho v|_z - \rho v|_{z+dz}}{dz} = \frac{d\rho}{dt}$$

La definición de $Flujo = \rho v \left[\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s} \right] \Rightarrow \frac{kg}{m^2 s}$, y considerando la variación de flujo en la celda se expresa como: $\Delta flujo = flujo \text{ final} - flujo \text{ inicial}$, aplicando derivadas parciales se tendrá: $\partial flujo = \partial \rho v = \rho v|_f - \rho v|_i$, sabiendo que el flujo final es menor al inicial tenemos: $-\frac{\partial(\rho v)}{\partial x}$, y haciendo para las demás variables se puede expresar como:

$$-\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Realizando un arreglo matemático tenemos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)_x}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)_y}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v)_z}{\partial z} = 0 \quad (7.4)$$

Ahora usando el operador diferencial nabra $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$, en coordenadas cartesianas x, y, z en el espacio euclidiano tridimensional y sabiendo que $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \text{Divergencia (Escalar)}$, $\vec{\nabla} \times \vec{A} = \text{Rotacional (Vector)}$ y $\vec{\nabla} \circ B = \text{Gradiente (Vector)}$ y siendo el vector $\vec{A} = Ax\vec{i} + Ay\vec{j} + Az\vec{k}$ se tendrá:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right) \cdot (Ax\vec{i} + Ay\vec{j} + Az\vec{k})$$

Y luego,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = \frac{\partial Ax}{\partial x} + \frac{\partial Ay}{\partial y} + \frac{\partial Az}{\partial z}$$

Ecuación de conservación de la masa

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{Variación de la densidad}} + \underbrace{\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v})}_{\text{Flujo de densidad}} = 0 \quad (7.5)$$

Partiendo de la (7.5), partimos para la deducción de la ecuación de continuidad para flujo incompresible. Al ser el flujo incompresible la densidad no cambia en el tiempo teniendo así, $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$, de esta manera la ecuación (7.5) tenemos: $\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$ y $\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0$ siendo este último los campos vectoriales solenoidales.

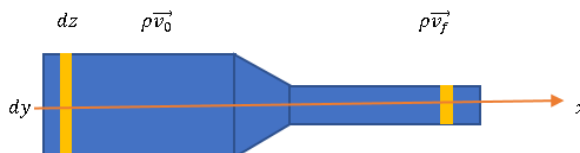


Figura 7.110: Ecuación de la Continuidad
Fuente: Los Autores

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Reemplazando el operador diferencial nabla tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) = 0$$

Ahora la derivada parcial podemos transformar en una derivada total y con ello tenemos:

$$\frac{d(\rho v_x)}{dx} = 0$$

Sabiendo que $\partial \text{flujo} = \partial \rho v = \rho v|_f - \rho v|_i$ tenemos:

$$\frac{(\rho v|_{x+dx} - \rho v|_x) dy \cdot dz}{dx \cdot dy \cdot dz} = 0$$

Ahora pasando a dividir la variable de densidad (ρ) y simplificado términos comunes tenemos:

$$v ds|_{x+dx} - v ds|_x = 0$$

$$v ds|_{x+dx} = v ds|_x$$

Ahora integrando ambos términos tenemos:

$$\int_0^{x+dx} v ds = \int_0^x v ds$$

$$v_f A_f = v_0 A_0 \quad (7.6)$$

Donde:

v_f = Velocidad final del fluido [m s^{-1}]

v_i = Velocidad inicial del fluido [m s^{-1}]

A_f = Sección final [m^2]

A_i = Sección inicial [m^2]

A continuación derivamos la ecuación de conservación de momento lineal, explicando cada uno de los pasos realizados.

7.1.2. DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DEL MOMENTO LINEAL

La cantidad de movimiento o momento lineal es una cantidad física que describe el movimiento de un cuerpo. Ésta obedece a la ley de conservación, lo cual significa que la cantidad de movimiento total de todo sistema cerrado, es decir donde no actúan fuerzas exteriores y las fuerzas internas no se disipan permaneciendo constante en el tiempo.

Los operadores diferenciales como el gradiente (vector), permiten predecir como varía algo en función de variables x, y, z , así tenemos: $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \right)$

Algunos conceptos básicos como: la derivada total en 1D es el movimiento en una dirección siendo en física la velocidad de un cuerpo $\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt}$, mientras la derivada parcial en 2D y 3D, la derivada direccional es $\vec{v}(s, r) \Rightarrow \frac{\partial \vec{v}}{\partial s}; \frac{\partial \vec{v}}{\partial r}$

Otras de las consideraciones tomadas es que el fluido se mueve en un sistema aislado, donde la temperatura en los dos puntos no pueden ser iguales ($T_2 > T_1$), la presión también ($P_2 > P_1$), y a volumen constante.

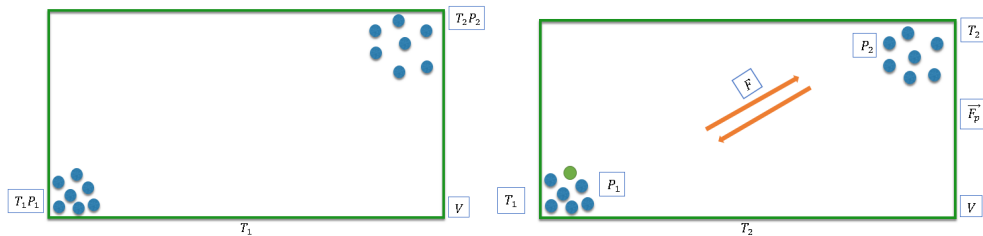


Figura 7.111: Fluido en Sistema Aislado

Fuente: Los Autores

Con lo considerado se puede establecer la siguiente ecuación:

$$\underbrace{\vec{F}_p}_{\text{Fuerza de presión para mover el gas}} = -\vec{\nabla}P \quad (7.7)$$

Reemplazando el operador diferencial ∇ en la ecuación (7.7), se expresa como:

$$\vec{F}_p = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} \right) P$$

$$\vec{F}_p = - \frac{\partial P}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial P}{\partial y} \vec{j}$$

De manera específica describimos el proceso que realiza la fuerza de presión para mover una partícula del gas en 1D.

Un ejemplo de movimiento lineal es la ecuación de primer grado, así se puede definir el movimiento de cualquier partícula como : $P(x) = C_1 x$, donde $P(x)$ es un escalar que describe el movimiento de la partícula a lo largo del eje x , y C_1 es una constante.

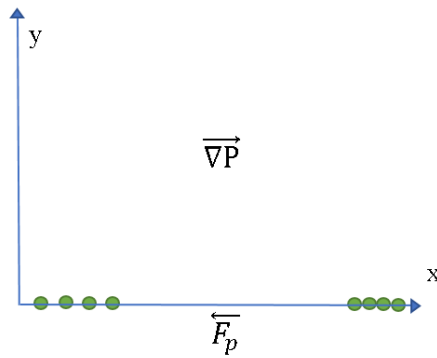


Figura 7.112: Sistema Aislado Unidireccional

Fuente: Los Autores

Aplicando la ecuación (7.7), y el operador diferencial $\vec{\nabla}$ para una dimensión se tendría lo siguiente:

$$\vec{F}_p = -\vec{\nabla}P$$

$$\vec{F}_p = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\vec{i}\right)P(x)$$

Escribiendo en términos simples de derivada parcial la ecuación se expresa como:

$$\vec{F}_p = -\frac{\partial P(x)}{\partial x}\vec{i} = -\frac{\partial(P(x))}{\partial x}\vec{i}$$

Reemplazando el escalar $P(x)$ en la expresión anterior:

$$\vec{F}_p = -\frac{\partial C_1 x}{\partial x}\vec{i}$$

La derivada parcial de F_p con respecto a x es la ecuación de la fuerza de presión para mover un gas en una dimensión:

$$\vec{F}_p = -C_1\vec{i} \tag{7.8}$$

Similar proceso ocurre cuando el movimiento de una partícula tiene 2 grados de libertad (dos dimensiones, 2D), y a continuación se muestra en la figura 7.113 como se mueve la partícula desde un punto a otro, considerando un sistema aislado bidireccional y el volumen es constante ($v = cte$).

Considerando el movimiento de la partícula ocurre desde el punto a hacia b este tendrá un vector fuerza \vec{F}_p que tratará de separarlas, mientras el gradiente de presión realizará una fuerza de oposición al considerar que $P_b > P_a$ por ello las partículas tienden a moverse en ese sentido.

Para este caso P es una función de dos variables, es decir una función real de variable vectorial expresado como: $P(x, y) = C_2(x + y^2)$, donde $P(x, y)$ es la función de dos variables, C_2 es una constante, y x, y son los ejes donde se mueve la partícula.

Aplicando la ecuación (7.7), con el operador diferencial $\vec{\nabla}$ para dos dimensiones y la función de dos variables $P(x, y)$, tendríamos:

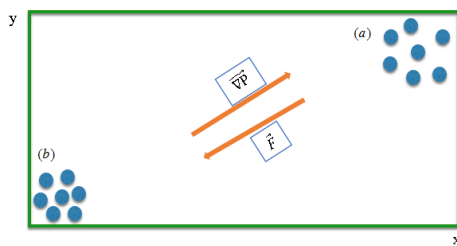


Figura 7.113: Sistema Aislado Bidireccional

Fuente: Los Autores

$$\vec{F}_p = -\vec{\nabla}P(x, y)$$

$$\vec{F}_p = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j}\right)P(x, y)$$

Introduciendo la función $P(x, y)$ dentro de la derivada parcial y luego reemplazando dicha función por su expresión funcional respectivamente tenemos:

$$\vec{F}_p = -\frac{\partial P(x, y)}{\partial x}\vec{i} - \frac{\partial P(x, y)}{\partial y}\vec{j}$$

$$\vec{F}_p = -\frac{\partial}{\partial x} [C_2(x + y^2)]\vec{i} - \frac{\partial}{\partial y} [C_2(x + y^2)]\vec{j}$$

Aplicando la derivada parcial de F_p con respecto a x siendo y una constante en el primer término de la igualdad, y en el segundo término de la igual la derivada parcial de C_2 con respecto a y , siendo x una constante, tenemos la ecuación la fuerza de presión para mover un gas en dos dimensiones:

$$\vec{F}_p = -C_2\vec{i} - 2yC_2\vec{j} \tag{7.9}$$

Dentro de los fenómenos físicos la aceleración de la gravedad siempre está presente, por ello describimos el movimiento de un gas considerando la fuerza gravitatoria.

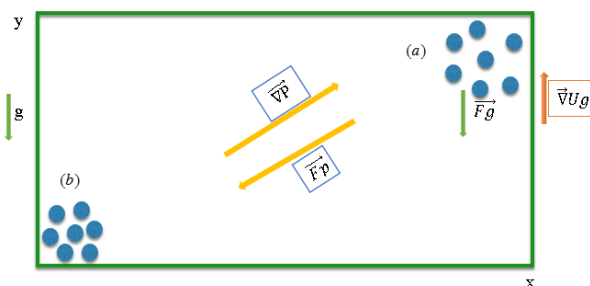


Figura 7.114: Fuerza Gravitatoria

Fuente: Los Autores

Por definición la energía potencial que posee un cuerpo de masa m y una altura y , y aceleración de la gravedad g , la ecuación de energía potencial U será:

$$U_g = mgy \tag{7.10}$$

Tomando en cuenta que el movimiento es en dos dimensiones la función que describe su trayectoria sería $P(x, y) = C_2(x + y^2)$. Entonces la fuerza gravitatoria puede expresarse como:

$$\vec{F}_g = -\vec{\nabla}U_g$$

Ahora el operador diferencial $\vec{\nabla}$ utiliza un grado de libertad siendo este en eje de las coordenada y que en término vectoriales sería \vec{j} con ello tenemos:

$$\vec{F}_g = -\left(\frac{\partial}{\partial y}\vec{j}\right)U_g$$

Sustituyendo la ecuación (7.10) en la anterior expresión tendremos:

$$\vec{F}_g = -\left(\frac{\partial}{\partial y}\vec{j}\right)(mgy)$$

Introduciendo los términos de la energía potencias dentro de la derivada parcial tendremos:

$$\vec{F}_g = -\frac{\partial}{\partial y}(mgy)\vec{j}$$

$$\vec{F}_g = -mg\vec{j} \Rightarrow F_g v = -\rho g \vec{j}$$

Aplicando la derivada parcial de F_g con respecto a y tenemos:

$$\vec{F}_p = -C_2\vec{i} - 2C_2y\vec{j}; \text{ Donde: } C_2 = cte.$$

Expresando en términos de volumen v , la fuerza se expresa como: $F_p v = -\vec{i} - 2y\vec{j}$

Por la ley segunda de Newton (ley fundamental de la dinámica) se sabe que las fuerzas que actúan sobre un cuerpo se mueve de tal manera que la varía su cantidad de movimiento con respecto al tiempo es igual a la fuerza que produce el movimiento, su ecuación es:

$$\sum \vec{F}_s = m\vec{a}_s \quad (7.11)$$

La sumatoria de fuerzas que actúan en nuestro caso son: \vec{F}_p y \vec{F}_g , sustituyendo en la ecuación (7.11):

$$\vec{F}_p + \vec{F}_g = m\vec{a}_s \quad (7.12)$$

Reemplazando \vec{F}_p y \vec{F}_g , y despejando la variables de la aceleración \vec{a}_s :

$$\vec{a}_s = \frac{1}{m} \left(-C_1\vec{i} - (mg + 2C_1y)\vec{j} \right)$$

Por definición $\vec{F} = m\vec{a}_s$, la densidad es $\rho = \frac{m}{v}$, y con ellos la fuerza volumétrica $\vec{F}v = \rho\vec{a}_s$. La aceleración al ser considerada como la derivada parcial de la velocidad con respecto tiempo, expresada como: $\frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t}$, y reemplazando en la ecuación (7.7), tenemos:

$$\therefore \rho \frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} = -\vec{\nabla} P$$

Reemplazando en la ecuación (7.12):

$$\rho \frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} = -\vec{\nabla} P - \rho g \vec{j} \quad (7.13)$$

Antes de seguir con el procedimiento hay que definir el término de derivada covariante $\vec{\nabla}_i$, siendo una generalización del concepto de derivada parcial ∂_i que nos permite extender el cálculo diferencial con respecto a las coordenadas cartesianas. Es decir, permite predecir el movimiento que tiene un vector:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_s$$

Introduciendo el vector de la velocidad de una partícula \vec{v}_s , en la deriva covariante tenemos:

$$\frac{d\vec{v}_s}{dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_s \vec{\nabla} \right) \vec{v}_s$$

Realizando la propiedad distributiva de la multiplicación se tiene:

$$\frac{d\vec{v}_s}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{v}_s + \vec{v}_s \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_s; \text{ Donde: } \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_s \text{ es el producto punto entre dos vectores.}$$

Reemplazo la expresión anterior en la ecuación (7.13), entonces tenemos:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} + \rho \vec{v}_s \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_s &= -\vec{\nabla} P - \rho g \vec{j} \\ \rho \frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} &= -\rho \vec{v}_s \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_s - \vec{\nabla} P - \rho g \vec{j} \end{aligned}$$

Como sabemos que $\vec{F}_g = -\vec{\nabla} g = -\rho g \vec{j}$, reemplazando tenemos:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} = -\rho \vec{v}_s \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_s - \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} U g$$

Sacando factor común $\vec{\nabla}$ obtenemos lo siguiente:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} = \vec{\nabla} [-\rho \vec{v}_s \vec{v}_s - P I + U g]; \text{ Donde: } I \text{ es un matriz identidad y } \vec{\nabla} \text{ es la divergencia (línea de vectores)}$$

Introduciendo ρ dentro de la derivada parcial, al ser considerada como constante, la ecuación de conservación de momento lineal se expresa como:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \vec{v}_s}{\partial t} + \vec{\nabla} [\rho \vec{v}_s \vec{v}_s + P I - U g]}_{\text{Ecuación de conservación de momento lineal}} = 0 \quad (7.14)$$

7.1.3. DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

Para deducir la ecuación de conservación de la energía, se considera un proceso adiabático.

El pionero en la experimentación sobre la expansión libre fue Joule (1844), demostró que la energía interna de un gas perfecto es independiente del volumen (V), o de la presión (P), sino solo en función de la temperatura (T)[11].

Considerando la primera ley de la termodinámica tenemos:

$$Q = \Delta U + W_s \quad (7.15)$$

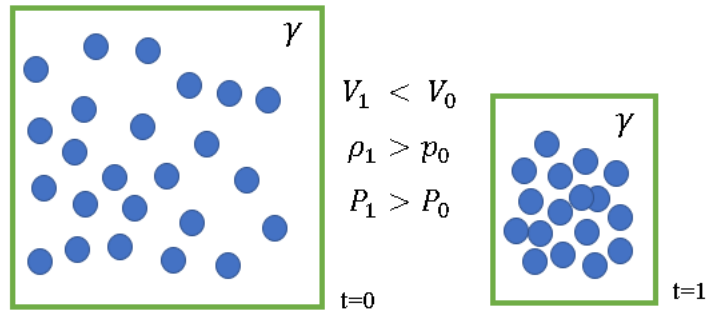


Figura 7.115: Características de un fluido
Fuente: Los Autores

Donde Q es el calor específico molar, y W_s es el trabajo de expansión libre. Hay que tomar en cuenta que tanto Q como W_s son nulos así: $\Delta U = 0$ con esto no hay variación en la energía interna en el proceso.

Ahora expresando en término diferenciales tenemos: $dU = \delta Q - \delta W = C_v dT$, donde C_v es el calor específico del gas a volumen constante, sin embargo para l expansión libre se considera $\delta Q = 0$; $\delta W = P\delta V$, con ello se obtiene:

$$dU = C_v dT = -P\delta V \quad (7.16)$$

Para un gas ideal se considera:

$$PV = nRT \quad (7.17)$$

Donde:

P = Presión [Pa]

V = Volumen [m³]

n = Número de moles del gas

R = Constante universal de gas ideal [8,3144 J mol⁻¹ K⁻¹]

T = Temperatura [°K]

Además por definiciones $C_p - C_v = R$, siendo C_p el calor específico a volumen constante, y el índice politrópico de un gas es la relación $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

Despejando P de la ecuación (7.17) se tendría $P = \frac{nRT}{V}$; ahora si despejamos C_p del índice politrópico tendremos $C_p = \gamma C_v$, y reemplazando en la R tenemos $C_v(\gamma - 1) = R$, entonces reemplazando en la ecuación (7.16):

$$dU = C_v dT = -\frac{nC_v(\gamma - 1)T\delta V}{V}$$

$$dU = dT = -\frac{n(\gamma - 1)T\delta V}{V}; \text{ siendo } n = 1 \text{ para un mol de gas}$$

$$\frac{dT}{T} = -\frac{(\gamma - 1)\delta V}{V} \quad (7.18)$$

Integrando la ecuación (7.18) entre dos estados de la transformación que para estudio serán 1 y 2:

$$\int_1^2 \frac{dT}{T} = -\int_1^2 \frac{(\gamma - 1)\delta V}{V}$$

Efectuando la integración, y siendo $(\gamma - 1)$ constante tendremos:

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -(\gamma - 1) \ln \frac{V_2}{V_1} = (\gamma - 1) \ln \frac{V_1}{V_2}$$

Aplicando leyes de logaritmos tenemos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma-1)}$$

Tomando en cuenta que cuando se trabaja con gas ideal debe cumplir $T = \frac{PV}{R}$, la expresión anterior puede quedar como:

$$\frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma-1)}$$

Aplicando producto de potencia de misma base:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{(\gamma)}$$

Finalmente a ecuación será:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = k = cte \quad (7.19)$$

Sabiendo que $V = \frac{m}{\rho}$, reemplazando en la ecuación (7.19), y dividiendo para m^γ :

$$\frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{P_2}{\rho_2^\gamma} = \frac{k}{m^\gamma} \quad (7.20)$$

Aplicando la derivada total a la presión P con respecto al tiempo, siendo k , m y γ constante en el tiempo, entonces:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P}{\rho^\gamma} \right) = 0$$

Aplicando la derivada total en la ecuación (7.20), de la densidad con respecto al tiempo:

$$-\gamma P \rho^{-\gamma-1} \frac{d\rho}{dt} = 0$$

Igualando las derivadas conseguidas tenemos:

$$\begin{aligned}\frac{1}{\rho^\gamma} \frac{dP}{dt} - \gamma \rho^{-\gamma-1} P \frac{d\rho}{dt} &= 0 \\ \rho^{-\gamma} \frac{dP}{dt} - \gamma \rho^{-\gamma-1} P \frac{d\rho}{dt} &= 0\end{aligned}$$

Sacando factor común de $\rho^{-\gamma}$, y pasando a dividir; la expresión queda:

$$\frac{dP}{dt} - \gamma \rho^{-1} P \frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (7.21)$$

Con la ecuación de la densidad (ya definida antes), tenemos:

$$\frac{d\rho}{dt} + \vec{\nabla} \rho \vec{v} = 0$$

Despejando $\frac{d\rho}{dt}$:

$$\frac{d\rho}{dt} = -\vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (7.22)$$

Reemplazo la ecuación 7.22 en ecuación 7.21, tenemos:

$$\begin{aligned}\frac{dP}{dt} - \gamma \rho^{-1} P \left[-\vec{\nabla}(\rho \vec{v}) \right] &= 0 \\ \frac{dP}{dt} + \gamma \rho^{-1} P \rho \vec{\nabla} \vec{v} &= 0\end{aligned}$$

Aplicando todas las operaciones matemáticas se obtiene:

$$\frac{dP}{dt} = -\gamma \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \quad (7.23)$$

Con la ecuación de estado del gas (definida en la siguiente sección) es $P = (\gamma - 1)\varepsilon\rho$, y aplicando la derivada de la presión P y ε con respecto al tiempo:

$$\frac{dP}{dt} = (\gamma - 1)\rho \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (7.24)$$

Reemplazando la ecuación (7.24) en la ecuación (7.23), y aplicando teoremas matemáticos obtenemos:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{P}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \quad (7.25)$$

Siendo ε la energía interna, y para la densidad de energía tenemos:

$$E = \rho\varepsilon + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (7.26)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(E + P)v] = 0 \quad (7.27)$$

7.1.4. DERIVACIÓN DE LA ECUACIÓN DE ESTADO DEL GAS

Un gas ideal está formado por partículas puntuales sin atracción ni repulsión ellas y cuyos choques son perfectamente elásticos.

Para la deducción de esta ecuación, iniciamos con el índice politrópico de un gas siendo su ecuación la siguiente:

$$\gamma = 1 + \frac{2}{f} \quad (7.28)$$

Donde:

γ = Índice politrópico [Adimensional]

f = Número de grados de libertad [Adimensional]

Para fines didácticos se trabajará con un átomo de hidrógeno. El objetivo es determinar su índice politrópico.

1. Gas Mono-Atómico (Hidrógeno)

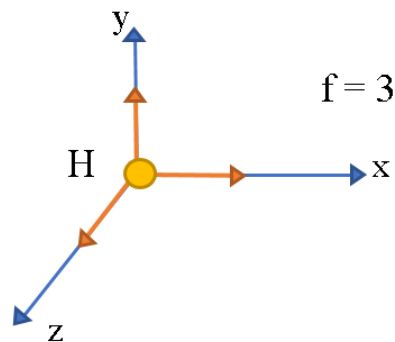


Figura 7.116: Grados de libertad del gas monoatómico

Fuente: Los Autores

Establecido el número de grados de libertad de la partícula, calculamos su γ de la siguiente manera:

$$\gamma = 1 + \frac{2}{3}$$
$$\gamma = \frac{5}{3}$$

Siendo $\frac{5}{3}$ el índice politrópico para un gas monoatómico ideal.

Ahora consideramos un gas diatómico (hidrógeno molecular) para el cálculo de su γ .

2. Gas Di-Atómico (Hidrógeno Molecular)

Para este ejemplo es necesario considerar dos tipos de grados de libertad: por traslación y por rotación, siendo 3 grados de libertad por traslación y 2 por rotación, entonces el número de grados de libertad total será la suma de sus dos valores, y así:

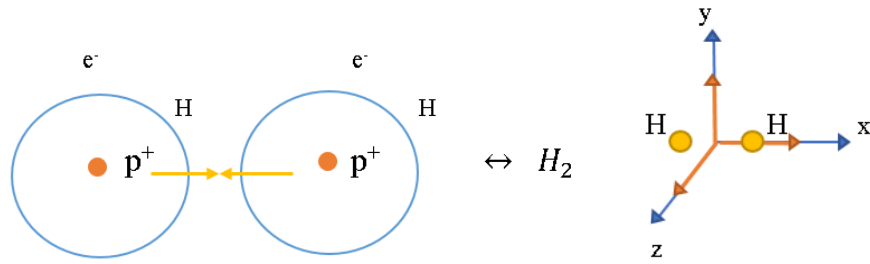


Figura 7.117: Grados de libertad del gas diatómico

Fuente: Los Autores

$$f_t = f_{tras} + f_{rota}$$

$$f_t = 3 + 2$$

$$f_t = 5$$

$$\gamma = 1 + \frac{2}{f}$$

$$\gamma = 1 + \frac{2}{5}$$

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

Siendo $\frac{7}{5}$ el índice politrópico para un gas diatómico.

La ecuación de gas ideal, definida en la sección anterior es $PV = nRT$. Sin embargo el número de moles del gas está expresado como:

$$n = \frac{N}{N_{av}} \quad (7.29)$$

Donde:

N= Número de partículas

N_{av} = Número de Avogadro $\left[\frac{\text{núm. de partículas}}{\text{núm. de moles}} \right]$

Si reemplazamos n en la ecuación de gas ideal tendremos:

$$PV = \frac{N}{N_{av}} RT$$

Por definición la constante de Boltzman es la relación de la temperatura absoluta y energía. Es decir $\frac{R}{N_{av}} = K_B$ y tiene un valor de $K_B = 1,3806488 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$, a esta ecuación de la denomina como ecuación de estado (EoS,¹¹ por sus siglas en inglés):

$$PV = NK_B T \quad (7.30)$$

¹¹ Equation of State

Ahora despejando P de la ecuación (7.30), y sabiendo que $\frac{N}{V} = \eta$:

$$P = \eta K_B T \quad (7.31)$$

De acuerdo con Callen, H (1981) [24], el número de densidad η es la relación del número de partículas y el volumen, y en la teoría cinética de los gases [5], la energía potencial volumétrica U es $P = \frac{U}{V}$, también se la puede escribir como [24]: $U = \frac{E_p}{V}$, y U también se la expresa como:

$$U = \frac{E_p}{V} = \frac{f}{2} \eta K_B T \quad (7.32)$$

Por las demostraciones antes realizadas se tiene que $\gamma = 1 + \frac{2}{f}$, despejando f y reemplazando en la ecuación (7.32), tenemos:

$$U = \left(\frac{1}{\gamma - 1} \right) \eta K_B T$$

Por lo antes demostrado en la ecuación (7.31), la U reescrita sería:

$$U = \left(\frac{1}{\gamma - 1} \right) P \quad (7.33)$$

A continuación algunos ejemplos de cálculo de la energía potencial volumétrica.

Para los elementos mono-atómicos se determinó el valor de $\gamma = \frac{5}{3}$ para ello se reemplaza en (7.33):

$$U = \left(\frac{1}{\frac{5}{3} - 1} \right) \eta K_B T$$

$$U = \frac{3}{2} \eta K_B T$$

Para los elementos di-atómicos se determinó el valor de $\gamma = \frac{7}{5}$ para ello se reemplaza en (7.33):

$$U = \left(\frac{1}{\frac{7}{5} - 1} \right) \eta K_B T$$

$$U = \frac{5}{2} \eta K_B T$$

Realizando una relación entre la energía potencial volumétrica y la densidad, a esta relación se la denomina energía interna o energía potencial másica (ε), derivada de la siguiente manera:

$$\frac{U}{\rho} = \frac{\frac{J}{m^3}}{\frac{kg}{m^3}} \text{ y eliminando los } m^3$$

$$\frac{U}{\rho} = \frac{J}{kg} = \varepsilon \text{ siendo la energía interna}$$

Al reemplazar U de la ecuación (7.33), en la expresión anterior tendremos:

$$\varepsilon = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho}$$

Por último despejamos P , y tenemos la ecuación de estado del gas:

$$P = (\gamma - 1)\varepsilon\rho \quad (7.34)$$

7.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Temperatura T [°C]	Densidad ρ [kg/m ³]	Peso Específico γ [N/m ³]	Viscosidad Dinámica μ [Pa*s]	Viscosidad Cinemática ν [m ² /s]
-40	1.514	14.85	1.51X10 ⁻⁵	9.98X10 ⁻⁶
-30	1.452	14.24	1.56X10 ⁻⁵	1.08X10 ⁻⁵
-20	1.394	13.67	1.62X10 ⁻⁵	1.16X10 ⁻⁵
-10	1.341	13.15	1.67X10 ⁻⁵	1.24X10 ⁻⁵
0	1.292	12.67	1.72X10 ⁻⁵	1.33X10 ⁻⁵
10	1.247	12.23	1.77X10 ⁻⁵	1.42X10 ⁻⁵
20	1.204	11.81	1.81X10 ⁻⁵	1.51X10 ⁻⁵
30	1.164	11.42	1.86X10 ⁻⁵	1.60X10 ⁻⁵
40	1.127	11.05	1.91X10 ⁻⁵	1.69X10 ⁻⁵
50	1.092	10.71	1.95X10 ⁻⁵	1.79X10 ⁻⁵
60	1.060	10.39	1.99X10 ⁻⁵	1.89X10 ⁻⁵
70	1.029	10.09	2.04X10 ⁻⁵	1.99X10 ⁻⁵
80	0.9995	9.802	2.09X10 ⁻⁵	2.09X10 ⁻⁵
90	0.9720	9.532	2.13X10 ⁻⁵	2.19X10 ⁻⁵
100	0.9459	9.277	2.17X10 ⁻⁵	2.30X10 ⁻⁵
110	0.9213	9.034	2.22X10 ⁻⁵	2.40X10 ⁻⁵
120	0.8978	8.805	2.26X10 ⁻⁵	2.51X10 ⁻⁵

Fuente: <http://www.civil.frba.utn.edu.ar/Materias/hidraulica/archivos/tablas-graficos.pdf>

7.3. COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL RODAMIENTO

SUPERFICIE	p	SUPERFICIE	p
Hormigón defectuoso	0,01	Macadam sinuoso	0,037
Hormigón plano	0,015	Nieve - 5 cm	0,025
Hormigón sinuoso	0,02	Nieve - 10 cm	0,037
Asfalto defectuoso	0,012	Superficie lisa	0,025
Asfalto plano	0,017	Superficie arenosa	0,04
Asfalto sinuoso	0,022	Barro	0,037 + 0,150
Macadam defectuoso (*)	0,015	Arena	0,060 + 0,150
Macadam plano	0,022	Arena suelta	0,160 + 0,300

Fuente: http://www.verion.com.ar/images/productos/tablas-de-conversion-y-formulas-aplicaciones_para_motores_hidraulicos.pdf

7.4. PESO BRUTO VEHICULAR DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-012-SCT-2-2014

PESOS MÁXIMOS AUTORIZADOS POR TIPO DE EJE Y CAMINO (t)

CONFIGURACIÓN DE EJES		VEHÍCULO	TIPO DE CAMINO			
			ET4 Y ET2 A4 Y A2	B4 Y B2	C	D
	SENCILLO DOS LLANTAS	B	6,50	6,00	5,50	5,00
	MOTRIZ SENCILLO CUATRO LLANTAS	B	12,50	10,50	9,00	8,00
	MOTRIZ DOBLE TANDEM SEIS LLANTAS	B	17,50	13,00	11,50	11,00
	MOTRIZ DOBLE TANDEM OCHO LLANTAS	B	21,00	17,00	14,50	13,50

Fuente: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Normas_Oficiales_Mexicanas/NOM-012-SCT-2-2014_sct_14nov14.pdf

7.5. FICHA TÉCNICA CHASIS MERCEDES BENZ OF 1724



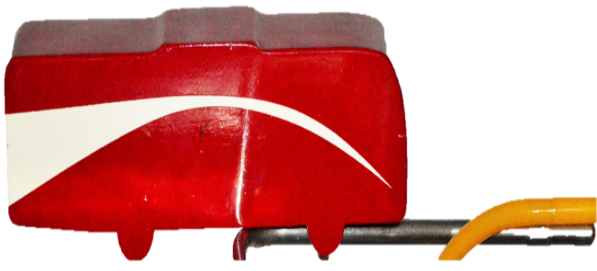
OF1724/59 - OF1724/59 L

Motor	OF1724 / OF1724 L	
Modelo	MB OM 926 LA.V/21 Euro V	
Tipo	6 cilindros verticales en línea, con turbocooler	
Cilindrada	7200 cm ³	
Potencia máxima (ISO 1585)	KW 175 (238 cv) @ 2200 / min	
Consumo específico	g / kWh 194 (143 g / cvh) @ 1400 / min	
Transmisión	OF1724 / OF1724 L	
Caja de cambios	MB G 85-6 / 6,70-0,73 - Transmisión Manual	
Marchas	6	
Relaciones 1ra / Última / Reversa	i = 6,70 / 3,81 / 2,29 / 1,48 / 1,00 / 0,73 marcha atrás = 6,29 MF 395 - Monodisco, seco, con accionamiento servo asistido, HD	
Ejes	OF1724 / OF1724 L	
Eje delantero	MB VL 3 / 8 D-6,5	
1º eje trasero	R 390-11,5 / S22,2	
2º eje trasero		
Reducciones	i = 5,875 (47:8)	

Fuente: <http://www2.mercedes-benz.com.ar/fichatecnica/Uploads/producto66.pdf>



7.6. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DE PRESIÓN


Tabla 7.86: Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones y con modificaciones en el punto 1

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-P1		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 CON Y SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	14	13	12				
40	76	73	72				
60	180	178	177				
80	279	330	323				
100	279	333	488				
120	279	333	489				
140	281	332	481				
160	277	333	478				
180	278	334	476				
200	280	333	479				
220	279	333	477				
240	280	332	475				
260	281	333	477				
280	280	331	478				
300	280	334	476				
320	281	332	479				
340	280	334	477				
360	281	334	476				
380	280	331	476				
400	279	331	477				
420	278	330	478				

Fuente: Los Autores




Tabla 7.87: Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones y con modificaciones en el punto 1.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P1		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 CON Y SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	15	14	13				
40	78	72	73				
60	185	179	178				
80	277	332	322				
100	276	333	490				
120	277	332	489				
140	277	333	483				
160	276	333	480				
180	275	335	477				
200	276	334	477				
220	274	334	476				
240	277	331	475				
260	275	332	476				
280	276	333	477				
300	277	334	475				
320	278	333	478				
340	277	334	477				
360	276	333	479				
380	278	332	478				
400	277	331	478				
420	276	332	477				






Fuente: Los Autores

Tabla 7.88: Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 2.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-P2		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
					Tipo de Ventilador		
					Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	9	11	13				
40	24	62	62				
60	61	148	148				
80	149	266	283				
100	223	267	392				
120	225	268	390				
140	222	269	389				
160	223	269	390				
180	223	265	386				
200	224	265	390				
220	223	267	389				
240	223	267	387				
260	222	269	388				
280	223	268	389				
300	224	269	387				
320	224	265	390				
340	223	267	389				
360	224	268	389				
380	223	269	388				
400	224	267	388				
420	223	268	387				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.89: Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 2.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P2		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	12	12	11				
40	65	64	63				
60	154	154	168				
80	234	282	284				
100	230	286	400				
120	228	280	401				
140	230	280	400				
160	230	277	401				
180	230	278	400				
200	229	276	401				
220	230	269	400				
240	230	279	399				
260	230	278	401				
280	230	279	400				
300	230	279	401				
320	229	279	400				
340	230	278	401				
360	230	278	400				
380	230	279	400				
400	231	279	401				
420	230	279	400				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.90: Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 2.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-P2-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	12	12	13				
40	65	66	67				
60	157	155	158				
80	225	276	288				
100	226	277	408				
120	224	277	408				
140	228	277	408				
160	226	278	407				
180	224	278	408				
200	226	278	406				
220	228	277	408				
240	224	278	407				
260	226	277	408				
280	224	277	406				
300	224	277	408				
320	225	278	407				
340	224	277	408				
360	224	277	407				
380	225	278	406				
400	224	278	406				
420	224	277	408				



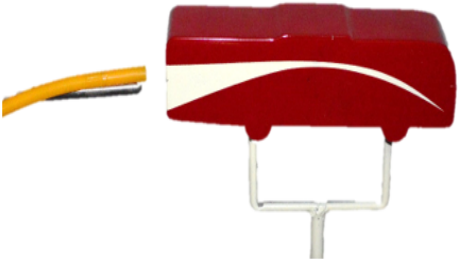
Fuente: Los Autores

Tabla 7.91: Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 2.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P2-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	12	11	11				
40	69	63	63				
60	161	150	150				
80	227	273	283				
100	227	277	395				
120	227	276	395				
140	225	274	395				
160	226	276	395				
180	224	275	398				
200	227	277	398				
220	223	273	396				
240	224	273	394				
260	225	274	392				
280	226	276	398				
300	226	277	398				
320	225	2277	397				
340	226	276	398				
360	224	274	395				
380	225	276	397				
400	224	275	398				
420	226	277	396				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.92: Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-P3		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	-3	-3	-4				
40	-18	-20	-19				
60	-45	-46	-47				
80	-68	-83	-87				
100	-69	-86	-129				
120	-69	-87	-127				
140	-68	-86	-128				
160	-69	-87	-130				
180	-69	-86	-130				
200	-69	-86	-130				
220	-68	-86	-129				
240	-69	-87	-129				
260	-68	-87	-130				
280	-68	-86	-130				
300	-69	-86	-129				
320	-69	-87	-129				
340	-68	-87	-130				
360	-68	-86	-130				
380	-69	-86	-129				
400	-69	-87	-129				
420	-69	-86	-130				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.93: Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P3		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	-4	-4	-2				
40	-20	-19	-12				
60	-50	-51	-29				
80	-67	-90	-88				
100	-63	-93	-127				
120	-57	-101	-142				
140	-57	-101	-149				
160	-55	-101	-151				
180	-53	-101	-148				
200	-54	-102	-150				
220	-52	-102	-151				
240	-53	-101	-150				
260	-53	-101	-151				
280	-53	-102	-150				
300	-54	-101	-148				
320	-53	-102	-149				
340	-54	-101	-150				
360	-53	-102	-151				
380	-54	-101	-150				
400	-54	-102	-151				
420	-53	-102	-150				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.94: Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-P3-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	-3	-3	-3				
40	-16	-15	-19				
60	-39	-40	-38				
80	-58	-73	-72				
100	-57	-77	-111				
120	-61	-77	-112				
140	-64	-77	-111				
160	-64	-77	-112				
180	-64	-77	-111				
200	-63	-77	-113				
220	-63	-78	-111				
240	-64	-78	-112				
260	-64	-77	-113				
280	-63	-78	-113				
300	-64	-77	-113				
320	-64	-77	-113				
340	-63	-78	-112				
360	-64	-78	-112				
380	-63	-78	-113				
400	-64	-77	-113				
420	-64	-78	-113				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.95: Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P3-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	-4	-4	-4				
40	-20	-21	-22				
60	-50	-53	-51				
80	-77	-95	-91				
100	-79	-96	-133				
120	-78	-95	-135				
140	-76	-96	-137				
160	-77	-96	-136				
180	-79	-96	-135				
200	-79	-97	-136				
220	-78	-96	-135				
240	-77	-96	-136				
260	-77	-96	-136				
280	-79	-97	-135				
300	-79	-96	-135				
320	-79	-96	-136				
340	-78	-96	-135				
360	-79	-97	-136				
380	-79	-96	-136				
400	-79	-96	-135				
420	-79	-97	-135				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.96: Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-P4		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	14	14	14				
40	74	76	70				
60	171	179	178				
80	263	321	326				
100	262	327	466				
120	263	327	466				
140	264	327	468				
160	265	327	472				
180	264	327	471				
200	265	328	472				
220	265	328	471				
240	265	327	472				
260	265	327	471				
280	264	328	470				
300	265	327	472				
320	264	327	471				
340	265	328	471				
360	265	327	472				
380	264	328	472				
400	265	328	473				
420	265	328	472				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.97: Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P4		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	12	13	12				
40	68	74	87				
60	165	170	167				
80	239	318	310				
100	249	317	473				
120	249	316	456				
140	249	311	450				
160	250	311	450				
180	249	314	449				
200	248	313	449				
220	248	315	441				
240	249	314	445				
260	249	311	447				
280	250	313	449				
300	249	315	449				
320	249	315	449				
340	250	314	446				
360	250	315	447				
380	249	314	448				
400	248	312	449				
420	250	313	448				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.98: Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-P4-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	13	14	14				
40	43	80	74				
60	75	178	177				
80	179	312	318				
100	256	312	453				
120	256	313	440				
140	256	315	453				
160	254	314	452				
180	256	313	452				
200	256	312	453				
220	255	315	453				
240	256	313	452				
260	254	314	453				
280	256	315	453				
300	256	312	453				
320	256	315	453				
340	255	314	452				
360	256	315	453				
380	256	314	453				
400	255	312	453				
420	255	313	452				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.99: Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P4-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	13	13	15				
40	65	75	70				
60	171	169	175				
80	245	307	311				
100	248	302	447				
120	245	303	436				
140	248	303	436				
160	246	301	435				
180	245	303	438				
200	247	302	435				
220	246	303	437				
240	245	302	437				
260	246	303	436				
280	245	302	435				
300	247	302	436				
320	246	303	436				
340	247	302	435				
360	246	302	436				
380	247	301	436				
400	246	302	437				
420	247	303	437				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.100: Resultados de presión para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 5.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-P5		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	14	5	6				
40	30	32	29				
60	72	72	69				
80	102	128	129				
100	106	128	184				
120	108	128	182				
140	102	127	182				
160	106	126	188				
180	104	129	186				
200	105	126	182				
220	108	128	188				
240	106	126	186				
260	105	129	188				
280	107	126	182				
300	106	127	186				
320	105	126	182				
340	108	128	188				
360	106	126	186				
380	105	129	188				
400	107	126	182				
420	106	127	186				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.101: Resultados de presión para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 5.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P5		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	7	6	6				
40	39	38	40				
60	120	92	44				
80	136	167	167				
100	136	163	246				
120	135	167	242				
140	133	165	238				
160	135	173	248				
180	137	167	241				
200	139	165	242				
220	135	166	246				
240	137	165	242				
260	133	165	241				
280	136	167	245				
300	135	166	246				
320	139	165	242				
340	135	166	246				
360	137	165	242				
380	133	165	241				
400	136	167	245				
420	135	166	246				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.102: Resultados de presión para el modelo 1 con modificaciones en el punto 5.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-P5-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	8	6	5				
40	39	18	33				
60	87	84	86				
80	131	148	154				
100	127	150	212				
120	127	154	216				
140	124	149	217				
160	122	155	215				
180	120	148	207				
200	127	147	208				
220	125	152	211				
240	124	148	208				
260	125	153	210				
280	125	147	207				
300	125	152	208				
320	127	147	208				
340	125	152	211				
360	124	148	208				
380	125	153	210				
400	125	147	207				
420	125	152	208				

Fuente: Los Autores



Tabla 7.103: Resultados de presión para el modelo 2 con modificaciones en el punto 5.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-P5-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	PRESIÓN [N]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0	0	0				
20	6	6	6				
40	30	30	29				
60	71	67	76				
80	98	125	127				
100	105	122	183				
120	103	120	183				
140	103	124	182				
160	100	127	182				
180	103	124	183				
200	101	123	179				
220	104	124	181				
240	102	124	175				
260	103	125	179				
280	102	123	183				
300	104	124	179				
320	101	123	179				
340	104	124	181				
360	102	124	175				
380	103	125	179				
400	102	123	183				
420	104	124	179				

Fuente: Los Autores

7.7. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES DE VELOCIDAD




Tabla 7.104: Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 1.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-V1		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.52	4.39	4.76				
40	8.75	8.85	10.17				
60	13.32	13.46	15.08				
80	17.58	17.25	17.79				
100	19.35	16.93	17.47				
120	18.26	16.88	17.37				
140	18.05	17.15	17.41				
160	17.51	16.67	17.18				
180	17.41	16.86	17.47				
200	17.05	17.00	17.44				
220	17.18	17.03	17.21				
240	16.73	17.18	17.44				
260	16.77	16.93	16.93				
280	16.54	16.83	17.25				
300	16.54	16.88	17.28				
320	16.39	16.93	17.00				
340	16.22	16.59	17.21				
360	16.29	16.83	17.25				
380	16.22	16.80	17.47				
400	15.98	16.67	17.34				
420	16.16	16.77	17.41				





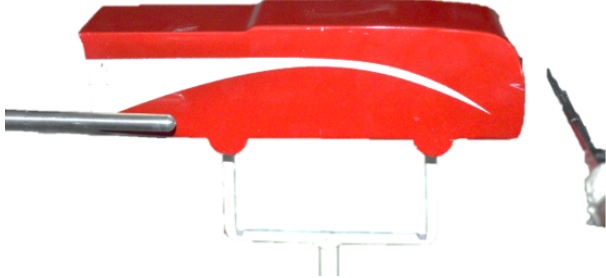
Fuente: Los Autores

Tabla 7.105: Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 1.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M2-V1		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	3.82	2.97	4.73				
40	8.55	6.45	9.20				
60	12.16	9.90	13.65				
80	13.40	11.56	15.24				
100	12.20	13.25	15.51				
120	12.11	12.81	15.45				
140	11.86	12.72	15.32				
160	11.94	12.54	15.42				
180	11.59	12.77	15.11				
200	11.64	12.91	15.29				
220	11.56	12.61	15.00				
240	11.69	12.74	15.08				
260	11.54	12.58	14.84				
280	11.52	12.61	14.77				
300	11.63	12.23	15.05				
320	11.63	12.62	14.95				
340	11.47	12.51	15.27				
360	11.56	12.43	15.15				
380	11.26	12.38	14.64				
400	11.39	12.57	15.15				
420	11.52	12.24	15.15				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.106: Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 1.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-V1-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.59	4.08	4.33				
40	8.76	8.14	8.34				
60	12.62	12.03	12.24				
80	14.63	15.90	15.90				
100	14.41	17.31	15.55				
120	14.19	16.36	15.59				
140	14.26	15.90	15.56				
160	14.36	15.56	15.55				
180	13.96	15.35	15.71				
200	14.20	14.95	15.45				
220	14.47	14.31	15.51				
240	13.94	14.44	15.59				
260	14.11	14.13	15.24				
280	14.11	13.85	15.17				
300	14.13	14.20	15.45				
320	14.19	14.06	15.59				
340	14.11	13.75	15.48				
360	14.20	13.70	15.11				
380	13.99	13.75	15.01				
400	14.36	13.50	15.24				
420	13.99	13.63	15.48				



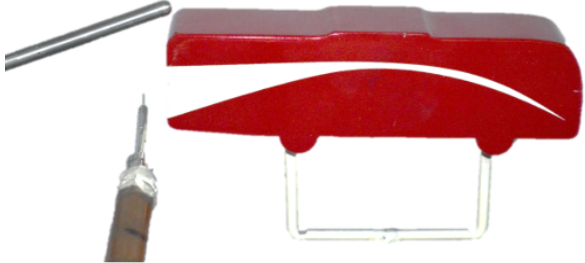
Fuente: Los Autores

Tabla 7.107: Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 1.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-V1-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	3.20	2.93	4.87				
40	7.38	6.48	9.36				
60	10.59	9.66	13.96				
80	12.27	11.37	15.86				
100	11.43	12.40	15.88				
120	11.16	12.45	15.63				
140	11.25	12.54	15.75				
160	11.01	12.50	15.51				
180	11.05	12.77	15.63				
200	10.81	12.69	15.24				
220	10.65	12.61	15.24				
240	10.98	12.61	15.56				
260	10.98	12.68	15.48				
280	10.62	12.72	15.48				
300	10.95	12.27	15.39				
320	11.05	12.61	15.45				
340	10.78	12.43	15.32				
360	10.62	12.57	15.01				
380	10.75	12.87	15.42				
400	10.72	12.74	15.29				
420	10.68	12.69	15.01				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.108: Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-V3		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	0.99	1.08	1.02				
40	2.12	2.23	2.33				
60	3.32	3.44	3.21				
80	4.39	5.28	5.38				
100	4.56	5.38	7.27				
120	4.64	5.84	7.81				
140	4.66	5.78	8.04				
160	4.63	5.61	8.41				
180	4.67	5.92	8.59				
200	4.49	5.64	8.21				
220	4.77	5.45	4.97				
240	4.62	5.34	8.55				
260	4.90	5.23	8.24				
280	4.57	5.38	8.34				
300	4.43	5.27	8.72				
320	4.74	5.52	8.42				
340	4.97	5.45	8.52				
360	4.76	5.17	8.45				
380	4.69	5.31	8.63				
400	4.80	5.51	8.42				
420	4.96	5.30	8.76				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.109: Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M2-V3		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	0.84	0.92	0.89				
40	2.07	1.86	2.12				
60	3.15	2.93	3.25				
80	4.33	3.85	5.35				
100	4.20	4.37	7.88				
120	4.25	4.56	7.92				
140	4.16	4.47	7.90				
160	4.26	4.54	7.58				
180	4.23	4.50	7.80				
200	4.37	4.64	7.80				
220	4.27	4.67	7.98				
240	4.26	4.74	7.84				
260	4.47	4.79	8.17				
280	4.36	4.88	8.17				
300	4.59	4.83	8.34				
320	4.52	4.84	8.17				
340	4.39	4.69	7.80				
360	4.44	4.98	7.98				
380	4.39	4.86	8.26				
400	4.50	5.00	8.34				
420	4.20	4.98	8.41				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.110: Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-V3-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
					Tipo de Ventilador		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	0.95	1.01	1.09				
40	2.26	2.53	2.61				
60	3.72	4.05	4.36				
80	4.81	5.74	6.53				
100	5.06	5.81	9.09				
120	4.76	5.94	9.98				
140	4.90	6.26	9.84				
160	4.93	6.13	8.31				
180	5.01	6.13	8.70				
200	5.03	6.18	8.05				
220	5.11	6.26	8.18				
240	5.13	6.12	8.83				
260	5.14	6.57	8.62				
280	4.91	6.45	7.97				
300	4.94	6.63	7.95				
320	5.14	6.52	8.24				
340	5.01	6.55	8.22				
360	5.00	6.53	6.86				
380	5.01	6.55	7.16				
400	4.81	6.57	7.57				
420	5.14	6.42	7.54				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.111: Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 3.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-V3-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	0.58	0.54	0.50				
40	1.14	1.32	1.45				
60	1.82	2.31	2.51				
80	2.29	3.71	4.59				
100	2.17	4.10	7.71				
120	2.31	4.05	8.39				
140	2.36	4.44	8.95				
160	2.31	4.23	9.33				
180	2.39	4.43	9.51				
200	2.40	4.30	9.76				
220	2.34	4.47	9.94				
240	2.41	4.50	10.11				
260	4.42	4.63	10.35				
280	4.71	4.70	10.75				
300	4.59	4.63	10.55				
320	4.62	4.63	10.44				
340	4.71	4.62	10.41				
360	3.83	4.46	10.37				
380	3.96	4.59	7.94				
400	4.02	4.56	7.95				
420	3.75	4.93	9.09				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.112: Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-V4		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	6.62	5.72	5.64				
40	12.95	12.45	12.31				
60	19.58	18.99	18.66				
80	22.44	24.50	25.25				
100	22.35	23.80	29.27				
120	22.46	24.89	29.12				
140	22.69	24.72	29.12				
160	22.51	24.64	28.98				
180	22.69	24.52	29.24				
200	22.89	24.25	28.68				
240	22.17	23.98	28.64				
260	22.54	24.45	28.58				
280	22.21	24.21	28.93				
300	22.76	24.52	28.98				
320	22.51	24.69	29.08				
340	22.24	23.94	28.84				
360	22.21	24.50	29.08				
380	21.87	24.89	28.84				
400	22.58	24.92	28.39				
420	22.35	24.10	28.54				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.113: Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-V4		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	5.33	4.80	4.80				
40	11.16	10.56	10.59				
60	17.25	15.90	16.10				
80	19.88	21.40	21.80				
100	20.38	21.51	26.06				
120	20.05	21.58	25.77				
140	20.31	21.37	26.10				
160	20.15	21.09	25.86				
180	20.28	21.48	26.03				
200	20.12	20.90	26.47				
220	20.45	21.12	26.36				
240	20.41	21.02	26.14				
260	20.12	21.66	26.18				
280	20.09	21.66	26.06				
300	19.92	21.26	25.65				
320	20.12	20.90	26.47				
340	20.45	21.12	26.36				
360	20.41	21.02	26.14				
380	20.12	21.66	26.18				
400	20.09	21.66	26.06				
420	19.92	21.26	25.65				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.114: Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-V4-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	5.75	5.42	5.58				
40	11.94	11.50	11.72				
60	17.96	17.61	18.49				
80	20.73	22.17	24.52				
100	21.09	22.35	28.58				
120	20.97	22.89	28.29				
140	20.69	22.99	27.87				
160	20.66	22.72	27.56				
180	21.14	22.99	28.13				
200	21.12	22.92	28.49				
220	21.23	22.95	28.39				
240	21.14	22.76	27.87				
260	21.09	22.89	27.90				
280	21.30	22.72	27.26				
300	21.14	23.37	27.35				
320	21.12	22.92	28.49				
340	21.23	22.95	28.39				
360	21.14	22.76	27.87				
380	21.09	22.89	27.90				
400	21.30	22.72	27.26				
420	21.09	23.37	27.35				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.115: Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 4.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M2-V4-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.94	4.73	4.79				
40	10.44	10.75	10.56				
60	16.39	16.20	16.60				
80	19.03	21.37	24.10				
100	19.16	21.30	26.03				
120	18.79	21.30	25.73				
140	19.30	21.37	25.56				
160	19.30	21.09	25.16				
180	18.89	21.43	25.62				
200	18.99	21.43	25.77				
220	19.35	21.40	25.47				
240	19.03	20.79	25.40				
260	18.89	21.43	25.73				
280	19.08	21.30	25.89				
300	19.26	21.26	25.29				
320	18.99	21.43	25.77				
340	19.35	21.40	25.47				
360	19.03	20.79	25.40				
380	18.89	21.43	25.73				
400	19.08	21.30	25.89				
420	19.26	21.26	25.29				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.116: Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 6.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-V6		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.36	4.28	5.12				
40	9.73	9.69	9.85				
60	15.07	14.74	15.10				
80	18.48	19.77	20.23				
100	18.31	20.67	24.87				
120	18.24	20.64	25.18				
140	18.13	20.78	24.94				
160	18.28	20.73	25.04				
180	18.40	20.54	24.69				
200	18.21	20.53	24.68				
220	18.25	20.83	24.87				
240	18.30	20.79	24.81				
260	18.46	20.66	25.02				
280	18.32	20.80	24.99				
300	18.56	20.76	24.77				
320	18.37	20.74	24.77				
340	18.28	20.62	25.02				
360	18.25	20.71	24.99				
380	18.49	20.85	24.56				
400	18.19	20.76	25.01				
420	18.22	20.47	24.71				



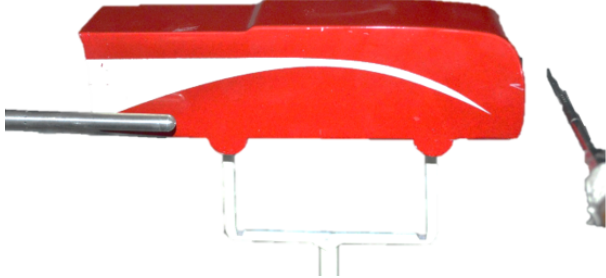
Fuente: Los Autores

Tabla 7.117: Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 6.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-V6		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	5.23	5.06	5.13				
40	10.56	11.28	11.23				
60	16.25	16.98	16.74				
80	19.84	22.54	22.24				
100	19.77	22.76	23.72				
120	20.17	22.59	23.57				
140	19.94	22.60	23.42				
160	20.03	23.01	23.31				
180	20.25	22.92	23.11				
200	20.15	22.63	23.23				
220	20.22	22.64	23.30				
240	20.05	22.87	22.83				
260	20.05	22.73	23.06				
280	20.06	22.70	23.09				
300	20.11	22.82	23.12				
320	19.99	22.83	23.50				
340	19.91	22.86	23.14				
360	20.14	22.72	23.43				
380	20.07	22.70	23.35				
400	19.96	22.82	23.36				
420	19.97	22.72	23.22				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.118: Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 6.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M1-V6-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.95	4.92	4897.00				
40	11.23	11.23	11.23				
60	17.13	17.26	17.23				
80	21.30	23.08	22.65				
100	21.13	23.70	28.55				
120	21.37	23.49	28.29				
140	21.23	23.82	28.21				
160	21.13	23.51	28.42				
180	21.34	23.46	28.57				
200	21.28	23.50	28.23				
220	21.27	23.82	28.18				
240	21.19	23.78	28.17				
260	21.17	23.69	28.18				
280	21.35	23.50	28.48				
300	21.21	23.68	28.26				
320	21.26	23.49	28.14				
340	21.46	23.51	28.15				
360	21.21	23.68	28.41				
380	21.45	23.70	28.41				
400	21.42	23.53	28.17				
420	21.27	23.50	28.17				



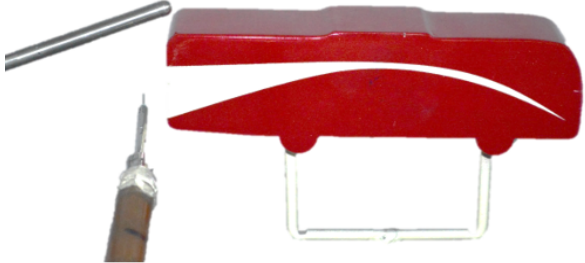
Fuente: Los Autores

Tabla 7.119: Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 6.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-V6-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	5.58	4.89	4.87				
40	10.90	10.91	12.43				
60	16.30	16.30	16.64				
80	18.81	22.06	21.66				
100	18.75	22.77	24.67				
120	18.59	22.41	23.96				
140	18.97	22.12	23.84				
160	18.89	22.32	23.13				
180	18.92	21.91	23.07				
200	18.66	21.95	22.91				
220	18.74	22.11	22.61				
240	19.07	22.08	22.76				
260	18.95	21.95	23.21				
280	19.00	22.24	22.69				
300	18.79	22.21	22.86				
320	18.85	22.25	23.10				
340	18.40	22.37	22.80				
360	18.89	22.34	23.04				
380	18.82	21.92	22.89				
400	18.81	21.94	23.07				
420	19.03	22.03	23.48				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.120: Resultados de velocidad para el modelo 1 sin modificaciones en el punto 7.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-V7		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
				Tipo de Ventilador		Turbo Axial	
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.08	4.16	4.36				
40	11.65	10.78	10.63				
60	16.60	16.70	16.70				
80	20.62	22.41	22.28				
100	20.55	22.91	27.59				
120	20.63	22.83	27.66				
140	20.55	22.91	27.67				
160	20.55	22.92	27.75				
180	20.52	22.95	27.71				
200	20.52	22.94	27.55				
220	20.58	22.89	27.85				
240	20.58	22.87	27.69				
260	20.65	22.83	27.68				
280	20.49	22.96	27.77				
300	20.65	23.08	27.62				
320	20.54	22.98	27.67				
340	20.57	22.90	27.73				
360	20.53	22.94	27.83				
380	20.59	22.88	27.42				
400	20.57	22.90	27.60				
420	20.59	22.83	27.77				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.121: Resultados de velocidad para el modelo 2 sin modificaciones en el punto 7.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-V7		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 SIN MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.99	4.71	4.75				
40	11.08	10.86	10.82				
60	16.86	15.77	16.63				
80	20.79	22.56	22.47				
100	20.88	23.16	27.71				
120	20.79	23.25	27.77				
140	20.80	23.29	27.67				
160	20.88	23.16	27.81				
180	20.70	23.11	27.72				
200	20.82	23.15	27.76				
220	20.80	23.13	27.67				
240	20.85	23.17	27.69				
260	20.83	23.09	27.84				
280	20.79	23.07	27.80				
300	20.68	23.05	27.78				
320	20.81	23.06	27.71				
340	20.77	23.16	27.78				
360	20.75	23.07	27.76				
380	20.86	23.16	27.88				
400	20.76	23.16	27.75				
420	20.73	23.15	27.63				




Fuente: Los Autores

Tabla 7.122: Resultados de velocidad para el modelo 1 con modificaciones en el punto 7.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental	Ítem			FICM-JO-M1-V7-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva	Revisado por:			Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]	Tipo de Sensor:			Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]	Sección de Prueba:			(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]	Tipo de Túnel de Viento:			Cerrado		
					Tipo de Ventilador		
					Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 1 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.62	4.14	4.45				
40	10.54	10.46	10.84				
60	16.54	16.83	16.78				
80	20.19	22.62	22.60				
100	20.24	22.75	27.73				
120	20.29	22.95	27.71				
140	20.32	22.74	27.71				
160	20.27	22.95	27.65				
180	20.17	22.81	27.69				
200	20.40	22.98	27.76				
220	20.40	22.91	27.80				
240	20.56	22.96	27.71				
260	20.46	22.89	27.79				
280	20.59	23.03	27.60				
300	20.56	22.95	27.78				
320	20.56	22.95	27.66				
340	20.46	23.01	27.74				
360	20.57	22.85	27.56				
380	20.54	22.94	27.73				
400	20.46	23.06	27.68				
420	20.48	22.84	27.52				

Fuente: Los Autores

Tabla 7.123: Resultados de velocidad para el modelo 2 con modificaciones en el punto 7.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA ANÁLISIS AERODINÁMICO DE AUTOBUSES					
DATOS INFORMATIVOS							
Tipo de Estudio:	Experimental		Ítem		FICM-JO-M2-V7-M		
Fecha de Ejecución:	14/6/2018						
Lugar de Estudio:	INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)						
Realizado por:	Jorge Manobanda Omar Silva		Revisado por:		Dr. Wladimir Banda PhD.		
DATOS TÉCNICOS DEL TUNEL DE VIENTO							
Potencia del Ventilador:	30 [HP]		Tipo de Sensor:		Anemómetro Hilo Caliente		
Frecuencia:	60 [Hz]		Sección de Prueba:		(500 x 1200) mm		
Caudal del ventilador	12.96 [m ³ s ⁻¹]		Tipo de Túnel de Viento:		Cerrado		
			Tipo de Ventilador		Turbo Axial		
CONDICIONES ATMOSFÉRICAS							
Temperatura:	21.8 [°C]	rpm	705	760	910	Densidad	0.8284
Tiempo de Estabilización:	120 [s]						
REGISTRO DE MEDICIONES							
TIPO DE MEDIDA:	VELOCIDAD [m/s]						
MODELO 2 CON MODIFICACIONES							
TIEMPO [s]	90 km/h	100 Km/h	120 km/h				
0	0.00	0.00	0.00				
20	4.21	4.35	4.17				
40	10.12	10.43	10.43				
60	15.90	16.08	15.78				
80	19.61	21.58	21.72				
100	19.61	21.82	26.18				
120	19.78	21.98	26.05				
140	19.53	22.14	26.18				
160	19.59	22.02	26.11				
180	19.58	21.84	26.26				
200	19.58	21.85	26.15				
220	19.69	21.88	25.94				
240	19.56	22.03	26.16				
260	19.45	21.96	26.27				
280	19.58	22.08	26.09				
300	19.53	21.94	26.20				
320	19.60	21.73	25.95				
340	19.71	21.85	25.87				
360	19.74	21.92	26.05				
380	19.37	21.87	25.83				
400	19.48	21.91	26.19				
420	19.59	21.97	25.95				

Fuente: Los Autores