



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**DESARROLLO DE MEJORAS A LA EFICIENCIA DE UN DISPOSITIVO WEC CON
HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICAS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ERIK AUGUSTO VILLAGÓMEZ REYES

TUTOR PRINCIPAL:
EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN – INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR:
RODOLFO SILVA CASARÍN – INSTITUTO DE INGENIERÍA
CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL – FACULTAD DE INGENIERÍA
LILIA CHÁVEZ REYES – FACULTAD DE INGENIERÍA
OSCAR ARTUTO FUENTES MARILES – INSTITUTO DE INGENIERÍA

CDMX ABRIL 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: **Escalante Sandoval Carlos A.**
Secretario: **Fuentes Mariles Oscar Arturo**
1 er. Vocal: **Mendoza Baldwin Edgar Gerardo**
2 do. Vocal: **Silva Casarín Rodolfo**
3 er. Vocal: **Reyes Chávez Lilia**

INSTITUTO DE INGENIERIA, CAMPUS C.U.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo



FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad, los medios y el entendimiento para iniciar y concluir esta etapa de formación educativa y de vida que experimenté y disfruté durante este ciclo.

A mi familia: padres, hermanos y sobrinos que me han brindado su apoyo y amor incondicional en todas las formas y circunstancias posibles.

A mi director y asesor de tesis: Dr. Edgar y Dr. Rodolfo por su apoyo, compartir parte de sus conocimientos, su guía, consejo y el haber formado un gran equipo de trabajo en el cual me pude integrar y apoyar durante mis estudios de doctorado.

A mis compañeros: por su apoyo, el compartir conmigo su tiempo, conocimientos, espacio, inquietudes y hacer esta experiencia más amena.

A CONACYT: por brindarme los medios económicos para iniciar y concluir mis estudios de doctorado.

A la UNAM: por pertenecer y ser parte de nuestra gran familia y brindarme todos los medios posibles para formarme como ser humano e investigador.

Y por último pero no menos importante a mi pareja gracias por todo y en todo, por impulsarme a ser mejor día a día, te amo.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	ix
NOMENCLATURA.....	xi
ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO.....	xiii
Capítulo I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
Capítulo II.....	4
2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO	4
2.1. OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
Capítulo III.....	6
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1. FÍSICA DEL OLEAJE.....	6
3.1.1. TEORÍA LINEAL DE ONDAS, TEORÍA DE AIRY.....	6
3.1.2. TEORÍAS NO LINEALES.....	7
3.1.3. TEORÍA DE STOKES.....	8
3.1.4. TEORÍA CNOIDAL.....	9
3.1.5. TEORÍA DE ONDA SOLITARIA	9
3.2. LOS MÉTODOS DE APROXIMACIÓN MEDIANTE FOURIER DENOMINADOS TEORÍA DE FENTON	9
3.2.1. ANÁLISIS TEMPORAL DE ESTADO DE MAR	10
3.2.2. ANÁLISIS ESPECTRAL.....	10
3.3. MODELO NUMÉRICO FLOW-3D.....	12
3.4. TURBINA TIPO WELLS.....	13
3.4.1. DISEÑO TEÓRICO DE LA TURBINA.....	13
3.4.2. ANÁLISIS DIMENSIONAL	14
3.5. CONDICIONES Y LEYES DE SIMILITUD	15
3.5.1. SIMILITUD GOEMÉTRICA.....	15
3.5.2. SIMILITUD CINEMÁTICA.....	16
3.5.3. SIMILITUD DINÁMICA	16
3.5.3.1. CONDICIÓN DE FROUDE	17

3.5.3.2. CONDICIÓN DE REYNOLDS.....	17
3.5.3.3. CONDICIÓN DE EULER.....	17
3.5.3.4. CONDICIÓN DE CAUCHY	17
3.5.3.5. CONDICIÓN DE MACH	17
3.5.3.6. CONDICIÓN DE WEBER	18
3.5.3.7. CONDICIÓN DE STROUHAL	18
3.6. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN	18
Capítulo IV	19
4. METODOLOGÍA.....	19
4.1. CARACTERIZACIÓN POR CFD DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET	19
4.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET	23
4.3. CFD DE LOS MODELOS CON EL SOFTWARE FLOW-3D.....	26
4.4. PRUEBAS DE LABORARIO DEL MODELO 10	29
4.5. FABRICACIÓN DEL MODELO10	32
4.6. PRUEBAS EN EL CANAL DE OLEAJE	35
4.7. PRUEBAS PARA EL REGISTRO DE LA PRESION A LA SALIDA DEL MODELO10	37
4.8. PRUEBAS PARA EL REGISTRO DE LA VELOCIDAD A LA ENTRADA DEL MODELO10.....	38
4.9. PRUEBAS PARA EL AFORO DEL VOLUMEN A LA ENTRADA DEL MODELO10 PARA LA OBTENCIÓN DEL GASTO.....	40
Capítulo V	41
5. RESULTADOS.....	41
5.1. SIMULACIONES	41
5.1.1. SIMULACIÓN 1 DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET.....	42
5.1.2. SIMULACIÓN 2 DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET.....	45
5.1.3. SIMULACIÓN DEL MODELO 1.....	46
5.1.4. SIMULACIÓN DEL MODELO 2.....	49
5.1.5. SIMULACIÓN DEL MODELO 3.....	52
5.1.6. SIMULACIÓN DEL MODELO 4.....	54
5.1.7. SIMULACIÓN DEL MODELO 5.....	56
5.1.8. SIMULACIÓN DEL MODELO 6.....	58
5.1.9. SIMULACIÓN DEL MODELO 7.....	60
5.1.10. SIMULACION DEL MODELO 8	62
5.1.11. SIMULACIÓN DEL MODELO 964	
5.1.12. SIMULACIÓN DEL MODELO 10	66
5.1.13. SIMULACIÓN DEL MODELO 11	69
5.1.14. SIMULACIÓN DEL MODELO 12	71
5.1.15. SIMULACIÓN DEL MODELO 13	73
5.1.16. SIMULACIÓN DEL MODELO 14	75
5.1.17. SIMULACIÓN DEL MODELO 15	77
5.1.18. SIMULACIÓN DEL MODELO 16	79

5.2.	COMPARACIÓN DE LAS SIMULACIONES DE LOS MODELOS	81
5.3.	COMPARACIÓN DE LAS SIMULACIONES 1 Y 2 DEL BLOW-JET CONTRA LOS ENSAYOS REALIZADOS POR CHÁVEZ DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW- JET.....	83
5.4.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO10 CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBAS DE LABORATORIO.	85
5.4.1.	PRESIÓN	92
5.4.2.	VELOCIDAD DE ENTRADA.....	93
5.4.3.	VELOCIDAD DE SALIDA Y GASTO DE SALIDA.....	94
5.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET CONTRA LOS RESULTADOS DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ MODELO10.	96
5.6.	FACTOR DE AMPLIFICACIÓN	98
5.7.	MATRIZ DE POTENCIA PARA EL MODELO10.....	101
5.8.	SUPERFICIE LIBRE	102
	PLANO MECÁNICO DE LA TURBINA TIPO WELLS.....	103
Capítulo VI	105
6.	CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	105
	BIBLIOGRAFÍA	107
	ANEXO A	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Rango de validez de las teorías de ondas.....	8
Figura 2	Turbina tipo Wells.....	13
Figura 3	Blow-Jet vectorizado, sometido a CFD, la pared es de gran calibre debido a la conformación de la malla en el FLOW-3D.....	19
Figura 4	Blow-Jet fabricado que fue sometido a pruebas de laboratorio por Chávez.....	20
Figura 5	Corte longitudinal del dispositivo.....	20
Figura 6	Interface del software FLOW-3D.....	21
Figura 7	Perspectiva isométrica del corte longitudinal del Blow-Jet y el mallado para correr la simulación en FLOW-3D.....	22
Figura 8	Tobera.....	24
Figura 9	Venturímetro.....	24
Figura 10	Superficie libre del agua.....	25
Figura 11	Empalme entre la cámara de compresión y la superficie libre del agua.....	25

Figura 12 Corte longitudinal del modelo 1.....	26
Figura 13 Muestra un script en el tiempo de una simulación.....	29
Figura 14 Corte longitudinal del modelo 10.....	29
Figura 15 Canal de oleaje.	31
Figura 16 Fotografía del canal de oleaje en toda su longitud.	31
Figura 17 Impresora 3D Ultimaker 2 Extended +	33
Figura 18 Proceso de impresión del modelo 10.....	33
Figura 19 Modelo 10 montando en el arnés de aluminio.....	34
Figura 20 Sensor de nivel.....	35
Figura 21 Distancia entre los sensores de nivel y su acomodo.....	36
Figura 22 Consola del sistema imc SPARTAN.	36
Figura 23 Gabinetes para conectar los sensores de nivel.	37
Figura 24 Sensor de presión.	37
Figura 25 Velocímetro acústico Doppler (Vectrino).	38
Figura 26 Probeta acondicionada para el aforo.	40
Figura 27 Ilustración de la simulación 1 del Blow-Jet.	42
Figura 28 Gráficas de velocidad y presión del dispositivo undimotriz Blow-Jet.....	43
Figura 29 Plano mecánico del dispositivo undimotriz Blow-Jet.....	44
Figura 30 Gráfico de la simulación 2 del Blow-Jet.....	45
Figura 31 Gráficas de velocidad y presión de la simulación 2 del Blow-Jet.....	45
Figura 32 Plano mecánico del modelo 1 sometido a CFD.....	47
Figura 33 Ilustración de la simulación del modelo 1.....	48
Figura 34 La gráfica de la izq. muestra la velocidad a la salida, a la der. se tiene la presión a la salida del modelo 1.....	48
Figura 35 Instante en el tiempo de la simulación del modelo 2.	49
Figura 36 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 2.....	50
Figura 37 Plano mecánico del modelo 2 sometido a CFD.....	51
Figura 38 Gráfico de la simulación del modelo 3.	52
Figura 39 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 3.....	52

Figura 40 Plano mecánico del modelo 3 sometido a CFD.	53
Figura 41 Gráfico de la simulación del modelo 4.	54
Figura 42 Gráficas de velocidad y presión de la simulación del modelo 4.....	54
Figura 43 Plano mecánico del modelo 4 sometido a CFD.	55
Figura 44 Ilustración de la simulación se adosó una concavidad en la salida del modelo. .	56
Figura 45 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 5.	56
Figura 46 Plano mecánico del modelo 5 sometido a CFD.	57
Figura 47 Instante en la simulación la bóveda sigue sin producir el efecto deseado, dren lento al interior.	58
Figura 48 Gráficas de velocidades y presiones de la simulación 6.....	58
Figura 49 Plano mecánico del modelo 6 sometido a CFD.	59
Figura 50 Instante de la simulación del modelo 7.....	60
Figura 51 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 7.....	60
Figura 52 Plano mecánico del modelo 7 sometido a CFD.	61
Figura 53 Frame de la simulación del modelo 8.....	62
Figura 54 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 8.....	62
Figura 55 Plano mecánico del modelo 8 sometido a CFD.	63
Figura 56 Gráfico de la simulación del modelo 9.	64
Figura 57 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 9.....	64
Figura 58 Plano mecánico del modelo 9 sometido a CFD.	65
Figura 59 Instante de la simulación del modelo 10.....	66
Figura 60 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 10.....	67
Figura 61 Plano mecánico del modelo 10 sometido a CFD.....	68
Figura 62 Ilustración de la simulación del modelo 11.....	69
Figura 63 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 11.....	69
Figura 64 Plano mecánico del modelo 11 sometido a CFD.....	70
Figura 65 Instante de la simulación del modelo 12.....	71
Figura 66 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 12.....	71
Figura 67 Plano mecánico del modelo 12 sometido a CFD.....	72

Figura 68 Gráfico de la simulación del modelo 13.	73
Figura 69 Gráficas de velocidad y presión a la salida de la simulación del modelo 13.	73
Figura 70 Plano mecánico del modelo 13 sometido a CFD.	74
Figura 71 Instante de la simulación del modelo 14.	75
Figura 72 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 14.	75
Figura 73 Plano mecánico del modelo 14 sometido a CFD.	76
Figura 74 Ilustración de la simulación del modelo 15.	77
Figura 75 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 15.	77
Figura 76 Plano mecánico del modelo 15 sometido a CFD.	78
Figura 77 Instante de la simulación del modelo 16.	79
Figura 78 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 16.	79
Figura 79 Plano mecánico del modelo 16 sometido a CFD.	80
Figura 80 Velocidades de salida de todos los modelos sometidos a CFD.	81
Figura 81 Presiones de salida de todos los modelos sometidos a CFD.	82
Figura 82 Velocidades de salida de las simulaciones 1 y 2 del Blow-Jet.	84
Figura 83 Plano mecánico de la 1er sección del modelo 10 para ensayos.	86
Figura 84 Plano mecánico de la 2da sección del modelo 10 para ensayos.	87
Figura 85 Plano mecánico de la 3er sección del modelo 10 para ensayos.	88
Figura 86 Plano mecánico del 1er acople cónico del modelo 10.	89
Figura 87 Plano mecánico del 2do acople cónico del modelo 10.	90
Figura 88 Plano mecánico del modelo 10 sometido a ensayos en el canal de oleaje.	91
Figura 89 Presiones de la prueba de laboratorio y del modelo numérico.	92
Figura 90 Presiones a la salida del dispositivo en el tiempo del modelo numérico izq. Presiones a la salida del dispositivo en el tiempo de la prueba de laboratorio der.	93
Figura 91 Velocidades de entrada del dispositivo modelo10 y ensayos.	94
Figura 92 Velocidad de entrada en el tiempo del modelo numérico izq. Velocidad de entrada en los ensayos de laboratorio der.	94
Figura 93 El gasto se muestra a la izq y la velocidad a la salida del dispositivo del modelo numérico der.	95

Figura 94 Presiones a la salida del dispositivo modelo10 y Blow-Jet.....	96
Figura 95 Presiones de la simulación del dispositivo Blow-Jet y de las obtenidas de los ensayos de laboratorio del modelo 10.....	97
Figura 96 Muestra las velocidades a las salidas del modelo 10 y Blow-Jet de las simulaciones.	97
Figura 97 Velocidades de salida de los dispositivos modelo 10 y Blow-Jet.	98
Figura 98 La gráfica de la derecha muestra la velocidad de entrada y salida del dispositivo modelo 10, la gráfica de la izquierda presenta el factor de amplificación.	98
Figura 99 A la der. se muestra la velocidad de entrada y salida del dispositivo modelo 10, la gráfica de la izq. presenta el factor de amplificación.	99
Figura 100 La figura de la der. muestra la velocidad de entrada y salida del dispositivo Blow-Jet, la gráfica de la izq. presenta el factor de amplificación.	100
Figura 101 Compendio de factores de amplificación.....	101
Figura 102 Registro en bruto, y registro con corrección aritmética.	103
Figura 103 Registro completo.	103
Figura 104 Plano mecánico de la turbina tipo Wells.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Metodología para el análisis temporal del oleaje.	10
Tabla 2 Metodología para el análisis espectral del oleaje.	12
Tabla 3 Valores de las escalas de longitudes.....	18
Tabla 4 Parámetros de entrada utilizados en las pruebas realizadas y en SUAVI.f90 por Chávez. Velocidades obtenidas con FLOW-MAP Y PROMATRIZ.f90.....	22
Tabla 5 Parámetros de entrada en el modelo numérico FLOW-3D para realizar la simulación del dispositivo undimotriz Blow-Jet.	22
Tabla 6 Relación de ensayos.....	30
Tabla 7 Propiedades de impresora e impresión.....	32
Tabla 8 Δ_{min} y Δ_{max} para los ensayos realizados.	35
Tabla 9 Especificaciones del sensor de presión.....	38

Tabla 10 Especificaciones del velocímetro acústico Doppler.....	38
Tabla 11 Velocidades medias y máximas de las simulaciones realizadas.....	83
Tabla 12 Velocidades medias y máximas de las simulaciones 1 y 2 y de las pruebas realizadas por Chávez del Blow-Jet.	85
Tabla 13 Muestra las presiones promedio y máximas del dispositivo.....	92
Tabla 14 Velocidades de entrada del dispositivo tanto para la modelación numérica como para los ensayos de laboratorio.	93
Tabla 15 Velocidades de salida.....	95
Tabla 16 Caudales a la salida del dispositivo en (l/s).	95
Tabla 17 Velocidades y presiones a la salida del dispositivo.	96
Tabla 18 Potencias de operación para varios periodos y alturas de ola.....	102

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centra en el rediseño geométrico del dispositivo undimotriz que lleva por nombre Blow-Jet. El dispositivo convertidor de la energía del oleaje WEC (por sus siglas en inglés) Blow-Jet fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. El rediseño del Blow-Jet parte de la premisa de optimizar dicho dispositivo, para esto se emplean herramientas numéricas y experimentales. Se realizaron diversas simulaciones con diferentes geometrías con el software FLOW-3D, con base en los resultados se elige la opción más prometedora en cuanto a velocidades y presión a la salida del dispositivo; además, fue la que menor reflexión presentó a la entrada del dispositivo. Se imprime dicha geometría a escala 1:20, se somete a una serie de pruebas en el canal de oleaje. Se comparan y validan los resultados de la simulación y los ensayos de laboratorio. Se propone una turbina tipo Wells con base en análisis teórico.

ABSTRACT

The present thesis focuses on the geometric redesign of the wave device called Blow-Jet. The WEC (wave energy converter) Blow-Jet was developed at the Engineering Institute of the National University of Mexico. The redesign of the Blow-Jet starts from the premise of the device optimization, for this, numerical and experimental tools are used. Several simulations with different geometries were performed with the FLOW-3D software. Based on the results, the most promising option in terms of velocity and pressure at the outlet of the device is selected, and the one with the minimum reflection presented at the inlet of the device. The geometry was printed at 1:20 ratio, a series of tests in the wave flume

were performed. Simulation results and laboratory tests are compared and validated. A Wells turbine is proposed based on theoretical analysis.

NOMENCLATURA

Teoría de Airy, teorías no lineales, teoría de Stokes, teoría cnoidal y teoría de onda solitaria

ρ	Densidad
μ	Viscosidad dinámica
∇	Operador vectorial nabra
\vec{u}	Campo escalar de velocidades del fluido
u	Componente horizontal de la velocidad
w	Componente vertical de la velocidad
ϕ	Potencial de velocidad
g	Aceleración debida a la fuerza de gravedad
t	Tiempo
P	Presión hidrostática del fluido
\vec{g}	Vector constante de aceleración producida por la gravedad
η	Superficie libre del agua
π	Pi (3.141592)
v	Condición de contorno
ψ	Potencial de velocidades normalizado
X	Límite del dominio en x
Y	Límite del dominio en y
R	Constante positiva

Métodos de aproximación mediante Fourier denominados como la teoría de Fenton (análisis temporal y análisis espectral).

θ_i	Dirección i ésima de onda
a_i	Amplitud i ésima
σ_i	Frecuencia i ésima
ε_i	Fase i ésima
$P(x)$	Función de distribución acumulada
$p(x)$	Función de densidad acumulada
S_{PM}	Espectro Pierson Moskowitz
$S(f)$	Densidad de energía
f	Frecuencia
α	Depende del fetch y del viento
m	Número de valores espectrales
γ	Peso específico
U	Velocidad del viento sobre la superficie libre
f_p	Frecuencia pico del espectro
f_c	Frecuencia de Nyquist

Turbina tipo wells

F_θ	Par de giro
F_x	Componente de la fuerza en x
c	Longitud de cuerda
B	Número de aspas
CL_{optimo}	Coefficiente de sustentación óptimo
U^*	Coefficiente de flujo
Δp_0^*	Coefficiente de presión

π	Pi (3.141592)
r	Radio de la turbina
C_L	Coefficiente de sustentación
C_D	Coefficiente de arrastre
ρ	Densidad
U	Velocidad de la corriente
R	Radio de la turbina
Δp_0	Caída de presión
Ω	Velocidad angular
T	Torque
Re	Número de Reynolds
σ	Solidez
h	Relación diámetros del cubo y del disco
Similitud o semejanza geométrica	
L_p	Longitud del prototipo
L_e	Escala de longitudes
L_m	Longitud homóloga en el modelo
V_e	Escala de velocidades
V_p	Velocidad de o en el prototipo
V_m	Velocidad homóloga de o en el prototipo
T_e	Escala de tiempo
T_p	Tiempo del o en el prototipo
T_m	Tiempo homólogo del o en el prototipo
F_e	Escala de fuerzas
Factor de amplificación	
$F.A.$	Factor de amplificación
V_s	Velocidad de salida
V_e	Velocidad de entrada
Metodología	
O_s	Orificio de salida
O_e	Orificio de entrada
l	Longitud
H	Altura de ola
T	Periodo
h	Profundidad
Δ_{min}	Distancia mínima entre sensores
Δ_{max}	Distancia máxima entre sensores
π	Pi (3.141592)
k	Número de onda

ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

La presente tesis se organiza de la siguiente manera:

Capítulo I INTRODUCCIÓN: Expone de manera breve el contexto actual de los dispositivos convertidores de la energía del oleaje WECs.

Capítulo II MOTIVACIÓN Y OBJETIVO: Menciona las razones y metas a alcanzar en este trabajo de tesis.

Capítulo III MARCO TEÓRICO: Incluye el fundamento teórico en que se basa y respalda la tesis.

Capítulo IV METODOLOGÍA: Se describe la metodología de cómo se desarrollaron las actividades de simulaciones ejecutadas y pruebas de laboratorio realizadas.

Capítulo V RESULTADOS: Presenta el análisis de los datos adquiridos y procesados.

Capítulo VI CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: La crítica, discusión conclusiones y futuras líneas de investigación se exponen en el presente capítulo.

Capítulo I

1. INTRODUCCIÓN

Debido al uso y explotación de fuentes de generación de energía de origen fósil no renovables, dada la tendencia de agotamiento en el mediano plazo y los efectos ambientales que estas fuentes producen, se hace imperativa la búsqueda y desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento.

Las fuentes de energía. Las fuentes de energía renovables, son aquellas que la naturaleza es capaz de regenerarlas en un corto lapso de tiempo. Los sistemas de generación de energía renovable más conocidos son los continentales: eólicos, solares e hídricos. Sin embargo, existen otras alternativas que han captado el interés de los investigadores en los últimos años tales como: la mareomotriz, geotérmica, gradiente salino, biomasa, corrientes oceánicas, vientos oceánicos y undimotriz u olamotriz. Esta última es producida por el movimiento de las olas (Amundarain, 2012), (Bahaj, 2011), (Brooke & ECOR, 2003).

Las olas oceánicas contienen una gran energía potencial. Actualmente existe una gran variedad de dispositivos convertidores de la energía del oleaje (WECs) por su siglas en inglés; desarrollados para aprovechar la energía de la olas, algunos de estos prototipos se han sometido a pruebas en interés de su comercialización (Ning, Zhou, & Zhang, 2018).

A lo largo de las últimas décadas se han diseñado y desarrollado una gran variedad de prototipos WECs (López et al., 2013). Los dispositivos WECs se pueden catalogar en función de su ubicación (Folley & Whittaker, 2009): cerca de la costa, en la costa, lejos de la costa, por tamaño y orientación con respecto a la ola incidente (Drew et al., 2009) principio de funcionamiento (Lagoun et al., 2011): WECs de diferencial de presión (Polinder et al., 2004), (QUB, 2002), boyantes o flotantes (Dettmer, 2008), (Chozas et al., 2012), rebosamiento (Kofoed et al., 2006), impacto (Doherty, 2014); recientemente se anexó la clasificación sistema de toma de potencia (PTO) por sus siglas en inglés:

generadores lineales (Henriques et al., 2016), (Polinder et al., 2003), (Polinder et al., 2000), aerogeneradores (Gato & Falcão, 1984), (Brito-Melo et al., 2002), (Santa et al., 2002) y sistemas hidráulicos (Henderson, 2006).

En comparación con otras fuentes de energía renovables, es evidente que los dispositivos undimotrices se encuentran aún, en sus primeras etapas de desarrollo. Existen algunos prototipos de plantas a gran escala de WECs, sin embargo, muy pocos han alcanzado un nivel de comercialización formal. La tendencia actual es el desarrollo de dispositivos puntuales, debido a su menor costo y complejidad (Albert et al., 2017). Algunos ejemplos de dichos dispositivos son: Wavestar, Pelamis, Wave dragon, Oyster, Mightywhale (Amundarain, 2012). Ya que las condiciones del entorno marino son extremas e impredecibles, la fiabilidad y facilidad de instalación-mantenimiento son aspectos de gran importancia para el diseño y desarrollo de un dispositivo WEC (Albert et al., 2017). Diversos investigadores concluyen que algunos de los principales desafíos a vencer son:

- Batimetría y distancia a la costa: Las instalaciones cercanas a la costa pueden tener una acción directa en las áreas costeras cercanas, rutas marítimas, áreas de pesca o impactos visuales. Las plataformas continentales estrechas y escalonadas cercanas a la costa también pueden tener un impacto negativo por razones económicas, principalmente la instalación (incluida la conectividad a la red) y el mantenimiento.
- Económicos: La gran diversidad de tecnologías de energías renovables marinas y el estado de desarrollo temprano en el que se encuentran, dan como resultado una amplia gama de costos de energía nivelados, en el caso particular de la energía de las olas que van desde 108 €/MWh a 530 €/MWh. Este nivel de incertidumbre económica crea un entorno menos favorable para las inversiones.
- Impactos ambientales potenciales: El ruido subacuático, la dispersión de sedimentos, el aumento de la turbidez, los efectos del campo electromagnético, la radiación de las olas y la alteración de la variación pueden conducir a cambios

significativos en la morfología costera; las estructuras fijas también pueden generar un efecto de arrecife artificial. Se concluye que los impactos ambientales para las energías renovables marinas, son apenas claros y no se cuantifican adecuadamente, por lo tanto, se necesita más investigación sobre este tema.

- Regulación y marco legal: Existe mucha incertidumbre a este respecto para las energías renovables marinas, y las entidades nacionales e internacionales relevantes no la abordan adecuadamente. Muchos parámetros clave que afectan directamente a cualquier instalación de energía renovable marina, están interrelacionados con otros aspectos, como la evaluación del impacto ambiental, los derechos y la propiedad, el derecho internacional, la gestión del espacio oceánico, etc.
- Infraestructura eléctrica: Por el contrario, a grandes distancias de la costa para minimizar los impactos negativos anteriormente citados sobre las áreas costeras, puede aumentar significativamente el costo de cableado y subestaciones, especialmente para áreas con grandes profundidades (Maria-Arenas, et al., 2019).

Actualmente los dispositivos undimotrices existentes están diseñados para operar en zonas con oleaje de alto potencial energético. Ya que México no posee ese tipo de oleaje (siendo los más grandes los que se encuentran en el pacífico norte mexicano) es necesario crear o adecuar la tecnología bajo las condiciones de oleaje existente en la zona.

Capítulo II

2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVO

Sucesos recientes, como el desastre de la planta nucleoelectrica en Japón, han puesto en duda la seguridad de la tecnología nuclear, esto ha provocado un desarrollo agresivo de energías sustentables, y ha impulsado la energía proveniente de la luz solar, energía eólica etc. Pero comparada con la energía de las olas, estas fuentes ofrecen menor densidad de energía por unidad de área (W/m^2) y por ello provee una inmensa oportunidad de producir hidrógeno de una forma barata complementado con los WECs. Los desafíos tales como la electrólisis del agua del océano para la generación de hidrógeno, así como la corrosión, la interacción del dispositivo con el entorno, y más aún si éstos se disponen a gran escala y en granjas.

México es un país de vastos recursos naturales, siendo su principal fuente de energía los hidrocarburos, las hidroeléctricas, la energía nuclear y parques eólicos; esto coloca al país en una posición óptima para empezar a buscar, desarrollar e implementar fuentes alternas como la energía proveniente de las olas. Ahora, considerando que México no posee oleaje de gran potencial energético, (siendo los más grandes los que se encuentran en el pacífico norte) es casi una obligación crear o adecuar la tecnología para aprovechar de forma eficiente el recurso.

De este modo, el objetivo principal de este trabajo de investigación es caracterizar el funcionamiento de un dispositivo de conversión de energía undimotriz llamado Blow-Jet para maximizar su eficiencia vía la modificación de su geometría, la cual será propuesta y probada tanto numérica como experimentalmente. Con el fin de eliminar el carácter oscilatorio de la energía tomada de las olas, se evaluará la factibilidad de acoplar al WEC una turbina Wells.

2.1. OBJETIVOS PARTICULARES

- Verificar el funcionamiento del dispositivo undimotriz Blow-Jet con que cuenta el instituto de Ingeniería, proponer y probar modificaciones a su diseño para lograr las mayores eficiencias posibles.
- Desarrollar versiones numéricas de los dispositivos con base en un modelo de tipo promediado de Reynolds ecuaciones de Navier-Stokes por la técnica de volumen de fluido-Reynolds averaged Navier-Stokes equations by volume of fluid technique (RANS-VOF) por sus siglas en inglés, que permita predecir el comportamiento de los dispositivos ante diferentes condiciones marinas.

Capítulo III

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen la física y matemática empleada para este trabajo de tesis, se puede dividir en cuatro temas principales: física del oleaje, modelo numérico, turbinas tipo Wells y leyes de similitud. Primero se describirá la física del oleaje comenzado con el trabajo del astrónomo inglés George Biddell Airy, posteriormente se expondrán las teorías no lineales: teoría de Stokes, teoría cnoidal, teoría de la onda solitaria, métodos de aproximación mediante Fourier denominados como la teoría de Fenton; se explica de forma breve el modelo numérico utilizado (FLOW-3D), se prosigue describiendo las turbinas tipo Wells y por último las leyes de similitud o semejanza.

3.1. FÍSICA DEL OLAJE

3.1.1. TEORÍA LINEAL DE ONDAS, TEORÍA DE AIRY

La propagación de oleaje en un fluido es un proceso no lineal sin embargo es posible simplificar su análisis físico y matemático con ciertas consideraciones:

- El agua es un fluido incompresible ($\rho=0$).
- Para el movimiento ondulatorio la gravedad y las diferencias de presión se consideran como las fuerzas principales, suponiendo que el fluido es no viscoso ($\mu=0$) y despreciando las tensiones tangenciales.
- Se considera que es un movimiento irrotacional $\vec{\nabla} \times \vec{u} = 0$ y por lo tanto definir un potencial de velocidades $\vec{\nabla} \phi = \vec{u}$.
- Se acepta que el movimiento tridimensional se reduce a una componente horizontal u y otra vertical w .
- Se considera que el fondo es plano, fijo e impermeable.

- Se supondrá la ola periódica y regular y que la única fuerza exterior que tiene efecto sobre el fluido es la gravedad terrestre. La tensión superficial tampoco se tendrá en cuenta.
- Se desprecian las pérdidas de energía por rotura de la ola y el efecto de Coriolis.

Tomando la ecuación de conservación de momentum para fluidos no viscosos (ecuación de Euler):

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \bar{V} (\vec{u}^2) + (\bar{V} \times \vec{u}) \times \vec{u} = \frac{1}{\rho} \bar{V} P + \vec{g} \quad [1]$$

3.1.2. TEORÍAS NO LINEALES

Los desarrollos de las teorías no lineales muestran una mejor representación de los fenómenos ondulatorios gravitacionales producidos en la superficie del mar para profundidades reducidas, donde las asunciones de la teoría lineal dejan de ser válidas. De manera general existen cuatro teorías principales no lineales de ondas propagándose en fondo horizontal:

- La teoría de Stokes.
- La teoría Cnoidal.
- Teoría de la onda solitaria.
- Los métodos de aproximación mediante Fourier denominados teoría de Fenton.

La solución matemática para teorías de primer orden está basada en la solución exacta de las ecuaciones de Laplace mientras que las teorías no lineales se basan en un desarrollo más complejo, sin embargo, este desarrollo parte de la teoría lineal a la que se le van sumando términos.

En una primera aproximación se puede establecer que la teoría de Stokes se adecúa mejor a olas cuya longitud de onda no difiera en gran medida de la profundidad a la que se encuentra, mientras que la teoría Cnoidal funciona mejor para longitudes de onda

mayores (Fenton, 1985), (Durst, 2008). La figura 1 muestra el nomograma de rangos de validez para cada teoría.

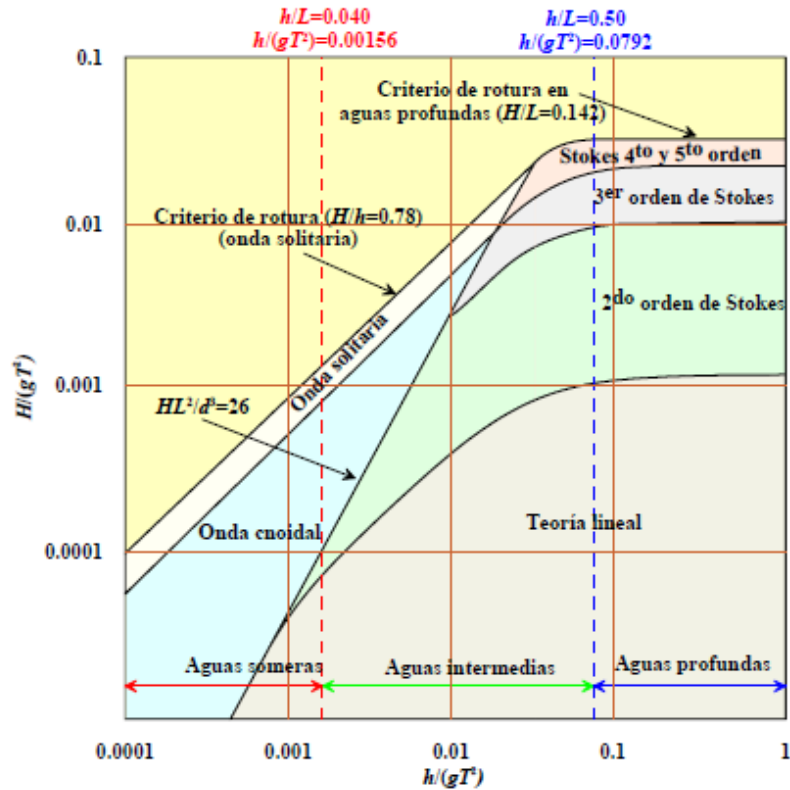


Figura 1 Rango de validez de las teorías de ondas.

3.1.3. TEORÍA DE STOKES

Stokes asumió que todas las variaciones en la dirección x pueden ser representadas por las series de Fourier, y que los coeficientes en estas series pueden ser escritos como expansiones de perturbación en términos de un parámetro el cual incrementa con la altura de ola. La solución yace en la substitución de las expansiones de perturbación de alto orden en las ecuaciones gobernantes, aunado a la manipulación de la series ecuaciones 2 y 3 (Holthuijsen, 2007), (Manual, S. P., 1984).

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = 0 \quad [2]$$

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \psi}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \psi}{\partial Y} \right)^2 \right]_{y=\eta(X)} + g\eta(X) = R \quad [3]$$

3.1.4. TEORÍA CNOIDAL

La teoría cnoidal fue originalmente desarrollada por Korteweg y de Vries (1895). En esta teoría se asume que la longitud de las ondas es muy superior a la profundidad de la perturbación al fondo, por lo que será aplicable a ondas de una amplitud finita en aguas someras incluyendo los efectos de la no linealidad y la dispersión (Holthuijsen, 2007).

3.1.5. TEORÍA DE ONDA SOLITARIA

Una onda solitaria es una ola que consiste en el desplazamiento del agua sobre el nivel medio de la superficie. Russell fue el primero en informar sobre esta ola causada por el tránsito de una barcaza en un canal. Esta ola también ha sido utilizada por Munk como modelo de ondas en la zona de surf. Además, describe de una manera razonablemente buena el comportamiento de la primera ola de un tsunami.

La masa de onda solitaria se encuentra totalmente por encima del nivel del agua en calma. La onda solitaria es una onda de traslación porque las partículas de agua se desplazan una distancia en la dirección de propagación de la onda a medida que esta pasa (Manual, S. P., 1984).

3.2. LOS MÉTODOS DE APROXIMACIÓN MEDIANTE FOURIER DENOMINADOS TEORÍA DE FENTON

En general, las olas en el mar no son regulares, es decir no tienen periodicidad con respecto al tiempo, sino que, por el contrario, el oleaje es un proceso esencialmente aleatorio. El oleaje puede ser considerado en términos prácticos como un conjunto de ondas viajando en diferentes direcciones, θ_i , con diferentes amplitudes, a_i , frecuencias, σ_i , y fases, ε_i , de tal forma que puede ser estudiado como una superposición lineal de ondas armónicas simples.

3.2.1. ANÁLISIS TEMPORAL DE ESTADO DE MAR

Dos funciones de probabilidad que describen al oleaje lineal aleatorio son: la función de distribución acumulada $P(x)$ y la función de densidad de probabilidad $p(x)$. Para las distribuciones de Gauss y Rayleigh. La función de distribución acumulada, es la probabilidad de que la variable aleatoria de tiempo $x(t)$ sea menor o igual a algún valor de amplitud. En la tabla 1 se detalla cada uno de los procesos involucrados.

Tabla 1 Metodología para el análisis temporal del oleaje.

A. Corrección del nivel medio	- Media
	- Lineal
	- Parabólica
B. Discretización de la señal (separa H y T)	- Método de pasos ascendentes por cero
	- Método de pasos descendentes por cero
	- Método de crestas
	- Método de valles
C. Estimación de cruces	
D. Evaluación de parámetros y velocidades orbitales	
E. Determinación de la dirección de oleaje	- Método gráfico con las velocidades

3.2.2. ANÁLISIS ESPECTRAL

Los métodos del estudio de oleaje basados en el análisis espectral sirven para determinar la distribución de energía de oleaje y sus parámetros estadísticos medios para cada frecuencia mediante la transformación de una serie de datos medidos en espectros de oleajes.

Otro aspecto de interés dentro del análisis espectral del oleaje es relacionar densidades espectrales de la evolución temporal de las elevaciones del mar con funciones teórico-empíricas. En este sentido dos de las funciones más utilizadas son:

- Espectro Pierson-Moscowitz (PM) de 1964, que se elaboró a partir de mediciones tomadas en buques oceanográficos en el atlántico norte. Este corresponde a un mar completamente desarrollado en aguas profundas y está basado en la teoría de similitud de Kitaigorodskii. Este espectro posee la forma de la expresión 4.

$$S_{PM} = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^2} f^{-5} \exp \left[-0.74 \left(\frac{g}{2\pi v f} \right)^4 \right] \quad [4]$$

Con $\alpha = 0.0081$, g es la aceleración de gravedad m/s^2 , v la velocidad del viento m/s a $19.5 m$ sobre el NMM (nivel medio de marea) y f la frecuencia en Hz . La energía del espectro S_{PM} , tiene unidades de m^2s .

- Espectro JONSWAP (Join North Sea Wave Project) de 1969. A partir del espectro PM se realizó una campaña para estimar un espectro para un mar no desarrollado completamente (limitado por fetch). Dicho espectro fue desarrollado durante los años 1968 y 1969. Está dado por la expresión 5.

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[\frac{\left(\frac{f}{f_p} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right] \quad [5]$$

Donde:

$$f_p = 3.5 \left[\frac{g^2 F}{U_{10}^3} \right]^{-1/3} \quad [6] \quad \alpha = 0.076 \left[\frac{g F}{U_{10}^2} \right]^{-0.22} \quad [7]$$

U_{10} es la velocidad del viento a $10 m$ sobre NMM y γ el factor de amplificación del pico. Las unidades de g , f , U_{10} y F son m/s^2 , Hz , m/s y m respectivamente. $S(f)$ tiene unidades de m^2s (Silva, 2005)

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t} \quad [8]$$

En la tabla 2 se presenta la metodología para realizar un análisis espectral del oleaje.

Tabla 2 Metodología para el análisis espectral del oleaje.

A. Corrección del nivel medio	- Media
	- Ecuación lineal
	- Ecuación parabólica
	- Filtro espectral
B. Aplicación de una función ventana	- Ventana tipo trapezoide
	- Ventana tipo coseno
C. Estimación de las componentes de Fourier	
D. Cálculo del espectro de energía	
E. Suavizado del espectro de energía	
F. Parámetros espectrales	
G. Estimación de la dirección del oleaje	

3.3. MODELO NUMÉRICO FLOW-3D

El modelo numérico FLOW-3D se enfoca en aplicaciones de superficie libre y multifase, sirviendo a una amplia gama de áreas incluyendo microfluidos, dispositivos biomédicos, infraestructura civil de agua, industria aeroespacial, productos de consumo, fabricación aditiva, impresión de inyección de tinta, soldadura láser, automotriz, costa afuera, energía y automotriz. También permite simular la evolución de fluidos en entornos confinados.

Es posible realizar análisis completos de interacción fluido-estructura para obtener las fuerzas, tensiones y deformaciones resultantes sobre cuerpos. FLOW-3D es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de propósito general. Emplea técnicas numéricas especialmente desarrolladas para resolver las ecuaciones de movimiento de fluidos para obtener soluciones tridimensionales transitorias a problemas de flujo multifísico y multiescala. Una serie de opciones físicas y numéricas permite aplicar FLOW-3D a una amplia variedad de fenómenos de flujo de fluidos y transferencia de calor. El movimiento del fluido se describe con ecuaciones diferenciales de segundo orden, transitorias y no lineales. Las ecuaciones de movimiento de fluidos se deben emplear para resolver estas ecuaciones. La ciencia de desarrollar estos métodos se llama dinámica de fluidos computacional. Una solución numérica de estas ecuaciones implica aproximar los diversos términos con expresiones algebraicas. Las ecuaciones resultantes se resuelven para dar una solución aproximada al problema original. El proceso se llama simulación. Se

puede generar una onda de Stokes de quinto orden en un límite de malla. El modelo se basa en la teoría de la onda Stokes de quinto orden desarrollada por Fenton (Science, 2012).

3.4. TURBINA TIPO WELLS

La turbina Wells fue propuesta en 1976 por Dr. A. A. Wells de Queen's University, Belfast. Fue la primera propuesta de turbina bidireccional. Cuando el flujo circula a través del conducto, y pasa en torno a los álabes, se generan fuerzas de arrastre y sustentación sobre cada uno de los álabes. La composición de las fuerzas induce un par de giro sobre el rodete. Por su rodete simétrico, la turbina Wells es ideal para trabajar en un flujo bidireccional. El par de giro inducido por F_θ siempre tiene el mismo sentido, independientemente de que el flujo sea de inhalación o de exhalación. No ocurre lo mismo con la otra componente de la fuerza, F_x , que generará un empuje axial oscilante sobre el rodete. La figura 2 muestra una turbina tipo Wells.

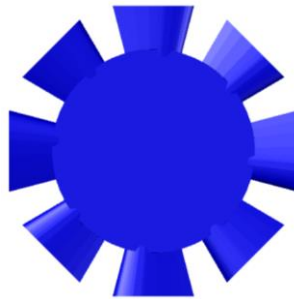


Figura 2 Turbina tipo Wells.

3.4.1. DISEÑO TEÓRICO DE LA TURBINA

El diseño aerodinámico de la turbina se encuentra caracterizado en primera medida por la forma que deben tener las aspas para extraer la energía disponible de la corriente de aire. Con la teoría de conservación del momento angular y las fuerzas aerodinámicas inducidas en el perfil, se obtiene la geometría óptima de las aspas representadas en la distribución de la longitud de cuerda (c) del perfil a lo largo del radio de la turbina. (Reyna, Espinosa,

Federico, Rubio, & Sánchez, n.d.) Para asegurar que la caída de presión sea constante a lo largo del disco de la turbina, la longitud de cuerda debe cumplir con la expresión:

$$\frac{B \times c \times CL_{\text{óptimo}}}{4\pi r} = \Delta p_0^* \times \frac{1}{\sqrt{1+(U^*)^2}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{\Delta p_0^*}{2} \times \left(\frac{2+(U^*)^2}{1+(U^*)^2}\right)\right)} \quad [9]$$

La expresión 9 involucra un coeficiente de sustentación ($CL_{\text{óptimo}}$) que es determinado en el punto de mayor relación CL/CD para un determinado ángulo de ataque del perfil.

3.4.2. ANÁLISIS DIMENSIONAL

Realizando un análisis dimensional, se pueden determinar cinco grupos adimensionales que caracterizan el funcionamiento de la turbina. Estos son función de la densidad del fluido (ρ), la velocidad axial del aire (U), el radio de la turbina (R), la caída de presión (Δp_0), la velocidad angular (Ω) y el torque (T).

Los cinco grupos adimensionales obtenidos son conocidos como:

- Coeficiente de flujo (U^*).
- Coeficiente de presión (Δp_0^*).
- Coeficiente de torque (T^*).
- Número de Reynolds (Re).
- Solidez (σ).

Estos números se convierten en los parámetros iniciales para el diseño de la turbina. La solidez es definida como la relación entre el área ocupada por las aspas y el área total descrita por la turbina. Para el caso de la turbina Wells la solidez es representada a través de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{B \times c}{\pi \times R \times (1+h)} \quad [10]$$

La solidez determina igualmente el comportamiento de arranque de la turbina. Para valores bajos de solidez, la turbina es incapaz de acelerar a la velocidad final de operación

cuando parte desde el reposo. Este fenómeno es conocido como (*crawling*) y es evitado garantizando un valor mínimo de solidez de 0.60.

3.5. CONDICIONES Y LEYES DE SIMILITUD

La mecánica de fluidos emplea los principios del análisis dimensional cuya técnica se apoya en el empleo de parámetros adimensionales, que permiten la transposición de los resultados de un modelo físico a la estructura real. La teoría de similitud que satisface esta necesidad fue establecida por Kline y enuncia: “Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los dos sistemas deben exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones”.

En general la similitud va más allá de los aspectos superficiales de similitud geométrica con lo cual erróneamente se confunde; aquella debe entenderse como la correspondencia conocida y usualmente limitada entre el comportamiento del flujo estudiado en el modelo y el flujo real, con similitud geométrica o sin ella. La similitud rara vez es perfecta debido a que comúnmente es imposible satisfacer todas las condiciones requeridas para lograrlas.

Por tanto, para que un modelo represente un fenómeno, debe cumplir tres condiciones de similitud o semejanza con su prototipo que son la geométrica, cinemática y dinámica (Wark & Richards, 2001), (Sotelo Ávila, 1997).

3.5.1. SIMILITUD GOEMÉTRICA

La semejanza geométrica implica de modo estricto que se cumpla que la relación entre dimensiones homólogas de modelo y prototipo sean iguales. Un modelo y un prototipo son geoméricamente similares si todas las dimensiones del cuerpo en cada una de las direcciones de los ejes coordenados se relacionan mediante la misma escala de longitudes.

$$L_p = L_e \times L_m \quad [11]$$

3.5.2. SIMILITUD CINEMÁTICA

Los movimientos en modelo y prototipo tienen similitud cinemática si partículas homólogas llegan a puntos homólogos en tiempos homólogos. Por tanto, la similitud cinemática obliga a que modelo y prototipo tengan una escala de líneas y también una escala de tiempos, con ello se logra una escala única de velocidades.

$$Ve = \frac{Vp}{Vm} \quad [12]$$

$$Te = \frac{Tp}{Tm} \quad [13]$$

3.5.3. SIMILITUD DINÁMICA

Si las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos del modelo y prototipo se relacionan entre sí mediante un valor fijo, Fe , (escala de fuerzas), se dice que se cumple la semejanza dinámica. El cumplimiento de ésta implica que existe semejanza geométrica y cinemática, por ello algunos autores indican que entre modelo y prototipo existe semejanza cuando cumplan con la semejanza dinámica. Los cocientes entre las fuerzas dadas en las ecuaciones definen los parámetros adimensionales más conocidos en hidráulica. De esta manera se tiene que:

- Número de Reynolds: Se define como la relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas.
- Número de Froude: Relaciona las fuerzas de inercia a las fuerzas gravitatorias.
- Número de Euler: El número de Euler relaciona las fuerzas de inercia a las fuerzas de presión.
- Número de Mach: El número de Mach relaciona las fuerzas de inercia a las fuerzas elásticas.
- Número de Weber: Relaciona las fuerzas de inercia a las fuerzas de tensión superficial.

Generalmente en un escurrimiento en particular no todas las fuerzas son importantes, de hecho, algunas pueden ser despreciables. Cuando esto ocurre la similitud dinámica se alcanza con un significativo grado de precisión. Algunas relaciones deben cumplirse entre las escalas cuando una fuerza tiene predominio sobre las demás son:

3.5.3.1. CONDICIÓN DE FROUDE

Rige aquellos escurrimientos en que la fuerza más importante es la de la gravedad y en los que puede despreciarse los efectos viscosos, como ocurre en escurrimientos turbulentos a superficie libre. La mayoría de los modelos en que se estudian obras hidráulicas, fluviales y marítimas cumplen con la condición de Froude.

3.5.3.2. CONDICIÓN DE REYNOLDS

Cuando en un escurrimiento la viscosidad del líquido gobierna o interviene en forma preponderante en el fenómeno por estudiar entre en modelo y el prototipo se dice que este problema se encuentra bajo la condición de Reynolds.

3.5.3.3. CONDICIÓN DE EULER

Se utiliza cuando en un escurrimiento las fuerzas de presión son las más importantes y gobiernan el escurrimiento del fenómeno por representar en el modelo. La cumplen simultáneamente tanto los modelos en que rige la condición de Froude como la de Reynolds.

3.5.3.4. CONDICIÓN DE CAUCHY

Se utiliza en estudios en los cuales la compresibilidad es importante, sin embargo, es poco utilizado en ingeniería.

3.5.3.5. CONDICIÓN DE MACH

Tiene pocas aplicaciones en modelos hidráulicos, se utiliza principalmente en modelos aerodinámicos.

3.5.3.6. CONDICIÓN DE WEBER

Se usa en problemas, relacionados con la tensión superficial tales como el estudio de modelos en los que se tienen pequeñas cargas de agua, en modelos marítimos si el oleaje tiene una longitud de onda menor a 0.03 m, ondas capilares en pequeños canales y el movimiento capilar en los suelos.

3.5.3.7. CONDICIÓN DE STROUHAL

Se utiliza en modelos hidroelásticos de compuertas donde se desea estudiar las vibraciones a las que estará sujeta la estructura, también se usa en modelos donde el escurrimiento es transitorio la frecuencia y la periodicidad del fenómeno es de importancia, o en problemas donde hay formación intermitente de vórtices.

La tabla 3 presenta los valores de las escalas de longitudes

Tabla 3 Valores de las escalas de longitudes.

	Froude	Reynolds	Weber	Mach
Longitud	Le	Le	Le	Le
Tiempo	\sqrt{Le}	Le^2	$\sqrt{Le^3}$	Le
Velocidad	\sqrt{Le}	$1/Le$	$1/\sqrt{Le}$	1
Aceleración	1	$1/Le^3$	$1/Le^2$	$1/Le$
Caudal	$\sqrt{Le^5}$	Le	$\sqrt{Le^3}$	Le^3
Presión	Le	$1/Le^2$	$1/Le$	1
Energía	Le^4	Le	Le^2	Le^3
Fuerza	Le^3	1	Le	Le^2

3.6. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN

El factor de amplificación es el incremento en la velocidad y se determina mediante la ecuación [14].

$$F. A. = \frac{v_s}{v_e} \quad [14]$$

Capítulo IV

4. METODOLOGÍA

4.1. CARACTERIZACIÓN POR CFD DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET

Retomando el trabajo realizado por Chávez (2010), se caracterizó el dispositivo undimotriz Blow-Jet vía CFD (computational fluid dynamics). Se empleó la función que desarrolló Chávez (2010) para el perfil del Blow-Jet, que mostró los mayores valores en velocidad de salida. Se vectorizó el modelo en 3D con las mismas dimensiones que utilizó Chávez (2010) con excepción del espesor de las paredes, el cual se muestra en la figura 3. La figura 4 presenta el dispositivo Blow-Jet que utilizó Chávez (2010) en las pruebas de laboratorio. La función para el Blow-Jet probado en el canal de oleaje del instituto de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México es: $y = 1.37178x^{(3/4)}$. Los valores de orificio de salida, orificio de entrada y longitud, utilizados por Chávez a escala 1:1 son (Chávez 2010), (Mendoza et al., 2015):

- Orificio de salida (O_s) = 21.0 mm
- Orificio de entrada (O_e) = 363.0424 mm
- Longitud (l) = 630 mm

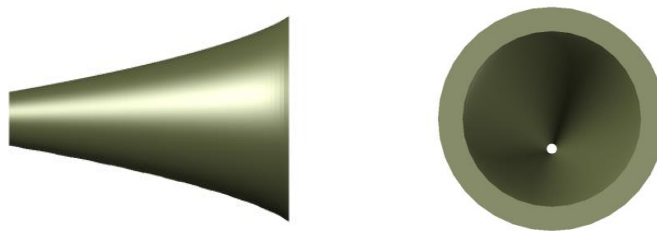


Figura 3 Blow-Jet vectorizado, sometido a CFD, la pared es de gran calibre debido a la conformación de la malla en el FLOW-3D.

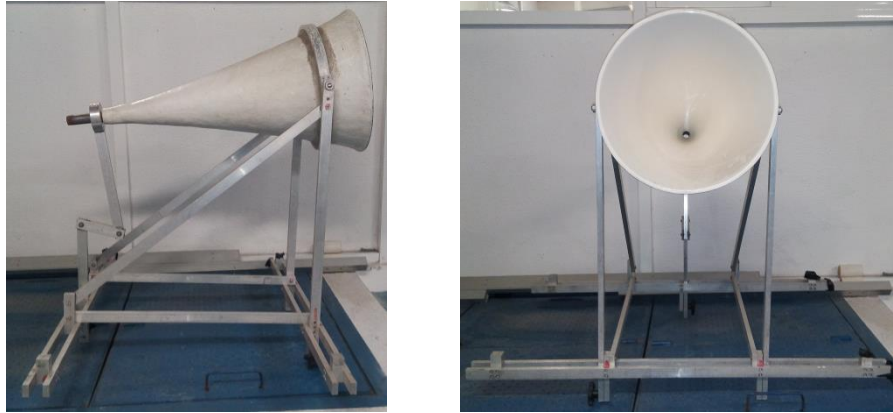


Figura 4 Blow-Jet fabricado que fue sometido a pruebas de laboratorio por Chávez.

- A. Una vez vectorizado el dispositivo, se produce un corte longitudinal en el Blow-Jet, como se muestra en la figura 5, dicho corte se realiza para ahorrar tiempo de cómputo, acelerar la duración de la simulación, que la malla tenga menor volumen total y menor número de celdas.

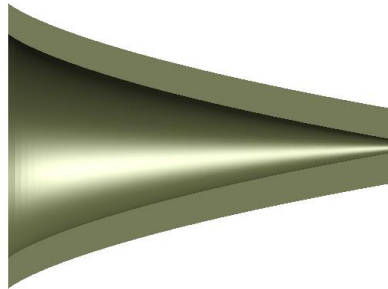


Figura 5 Corte longitudinal del dispositivo.

- B. Se ejecutó el software FLOW-3D para implementar CFD (computational fluid dynamics), una vez desplegada la interface. En el menú, elegir File, desplazar hasta la opción Add Example y seleccionar Stokes Surface Wave figura 6; esta opción precarga en la interface ciertos parámetros necesarios para la solución de problemas de superficie libre, enfocados a oleaje.

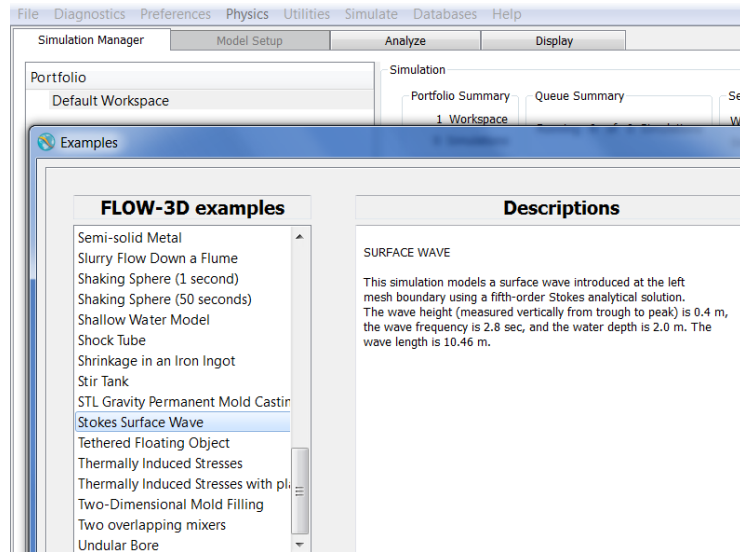


Figura 6 Interface del software FLOW-3D.

- C. Se importa el archivo del dispositivo vectorizado figura 5 al software FLOW-3D a escala 1:1, se asigna el número de bloques que conforman la malla, las dimensiones de dichos bloques, número de celdas que conforman cada bloque, condiciones de frontera, tensión superficial, tipo de fluido, densidad, viscosidad, temperatura, unidades de entrada, paso de tiempo, duración de la simulación, gravedad, longitud de onda, periodo, profundidad, si los solvers actúan de forma implícita o explícita, productos que deseamos obtener, tipo de oleaje regular o irregular, este último requiere de un registro previo ya sea de alturas de ola o registros de viento, podemos ingresar batimetrías, como se mencionó antes se pueden importar geometrías más complejas hechas en algún software especializado de dibujo. Como se observa hay múltiples opciones y tipo de configuraciones que podemos ingresar en el modelo numérico, el numerar y describir las opciones y alcances del software tomaría mucho tiempo y no es el objetivo de este trabajo de investigación.
- D. La tabla 4 presenta los parámetros utilizados por Chávez (2010) para las pruebas experimentales realizadas en el canal de oleaje, se presentan los parámetros que se ingresaron en el modelo numérico para caracterizar el dispositivo Blow-Jet diseñado por Chávez (2010) en la tabla 5. Se cotejan los resultados de la simulación con los ensayos realizados en laboratorio por Chávez (2010), además, de obtener

valores de presión al interior y salida del dispositivo los cuales no pudo obtener Chávez (2010) debido a las limitaciones del equipo, instrumentación y físicas del entorno. En la figura 7 se muestra un corte en perspectiva isométrica del corte longitudinal de dispositivo Blow-Jet, y la malla creada, para correr la simulación en el software FLOW-3D.

Tabla 4 Parámetros de entrada utilizados en las pruebas realizadas y en SUAVI.f90 por Chávez. Velocidades obtenidas con FLOW-MAP Y PROMATRIZ.f90.

Parámetros de entrada (canal de olaje y SUAVI.f90)					Velocidades obtenidas con PROMATRIZ.f90	
Sumergencia S	Profundidad h (m)	Inclinación I (°)	Altura de ola H (m)	Periodo T (s)	Velocidad promedio a la salida (cm/s)	Velocidad máxima a la salida (cm/s)
1/2	0.64	10.00	0.08	1.20	1.897	13.00
2/3	0.70	10.00	0.08	1.20	3.03	26.88

Tabla 5 Parámetros de entrada en el modelo numérico FLOW-3D para realizar la simulación del dispositivo undimotriz Blow-Jet.

Parámetros de entrada en el software Flow-3D				
Sumergencia S	Profundidad h (m)	Inclinación I (°)	Altura de ola H (m)	Periodo T (s)
1/2	0.64	10	0.08	1.2
2/3	0.7	10	0.08	1.2

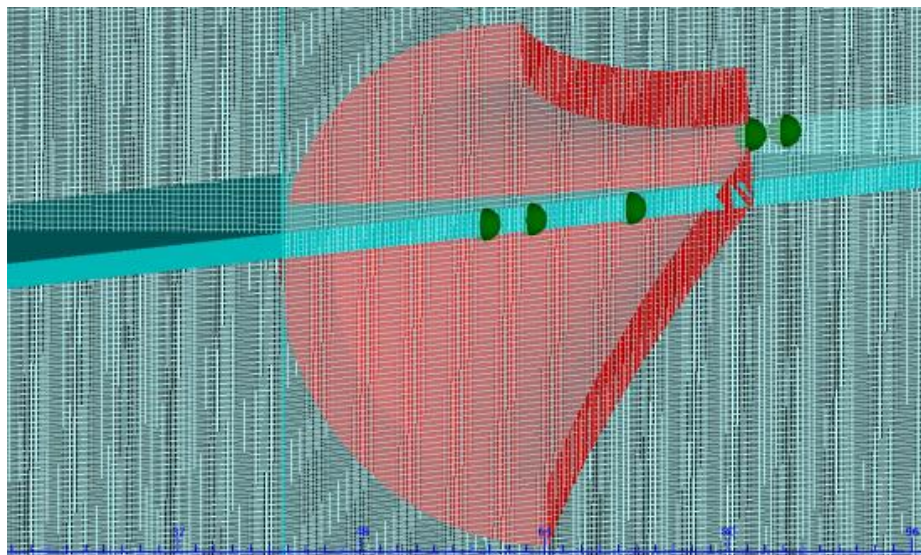


Figura 7 Perspectiva isométrica del corte longitudinal del Blow-Jet y el mallado para correr la simulación en FLOW-3D.

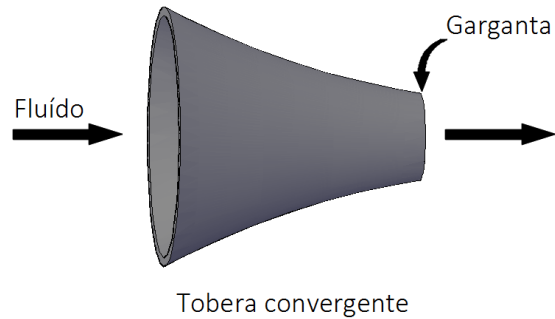
- E. Una vez concluida la simulación se procesan los datos los resultados se muestran en el capítulo de resultados.

4.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL NUEVO DISEÑO DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET

Con base en el trabajo de Chávez (2010) que concluyó: “es prioridad el realizar un análisis de presiones en el interior del Blow-Jet, con la finalidad de comprender el fenómeno interno e inferir con mayor certeza la ubicación de un cambio en la geometría del Blow-Jet que haga las veces de una cámara de compresión”.

Replanteando el diseño debido a la escala poco convencional con la que fue concebido el dispositivo, buscando un desempeño hidrodinámico mejor o similar (a una escala realista y plausible de poder ejecutarse que genere interés a inversión).

- A. Los nuevos diseños de las geometrías se conceptualizaron como la combinación de una tobera y venturímetro. Tobera es un dispositivo que incrementa la velocidad (y, por tanto, la energía cinética) de un fluido a expensas de una caída de presión en la dirección de la corriente. Venturímetro consiste en producir un estrangulamiento en la sección transversal de una tubería, el cual modifica las presiones. Con la medición de ese cambio es posible conocer el gasto que pasa por la sección. Y consta de tres secciones generales (zona de captación, zona compresión y un flujo a presión en la salida). En las figuras 8 y 9 se presentan una tobera y un venturímetro respectivamente (Sotelo Ávila, 1997), (Chow, 1994) y (CONAGUA, 2019).



Tobera convergente

Figura 8 Tobera.

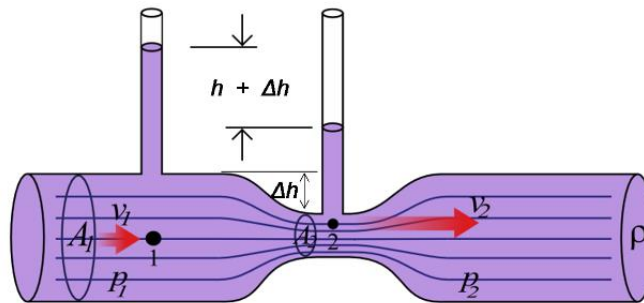


Figura 9 Venturímetro.

B. Se ingresan los valores de altura de ola, periodo y profundidad como parámetros de entrada en el modelo numérico con base en los valores promedios del litoral de la república mexicana en cuanto altura de ola y periodo; con respecto a la profundidad se determinó la profundidad mínima para que los rangos de validez de las teorías de ondas correspondan a 2° orden de Stokes; dichos valores son:

- Altura de ola $H = 2$ m.
- Periodo $T = 6$ s.
- Profundidad $d = h = 10$ m.

C. Se calculó y graficó la superficie libre del agua η con los valores de altura de ola, periodo y profundidad, recurrimos al nomograma de la figura 1 para determinar la teoría de ondas que aplica, resultando en teoría 2° orden de Stokes, en la figura 10 se muestra la superficie libre del agua resultante de la altura de ola, periodo y profundidad establecidos.

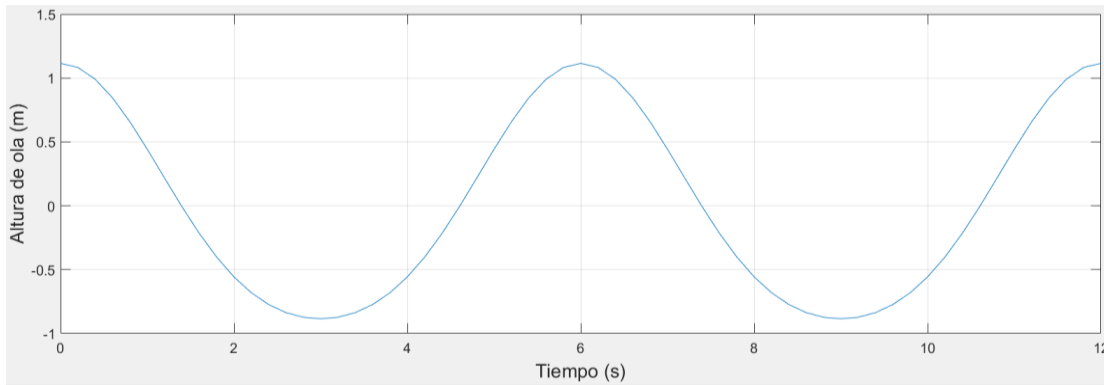


Figura 10 Superficie libre del agua.

D. La cámara de compresión se diseñó con la forma del perfil de la ola, es decir, el ángulo de la sección cónica de la unión del diámetro mayor con el diámetro menor, coincide con el contorno de la superficie libre del agua, la figura 11 muestra el empalme de la cámara de compresión y el contorno de la superficie libre del agua.

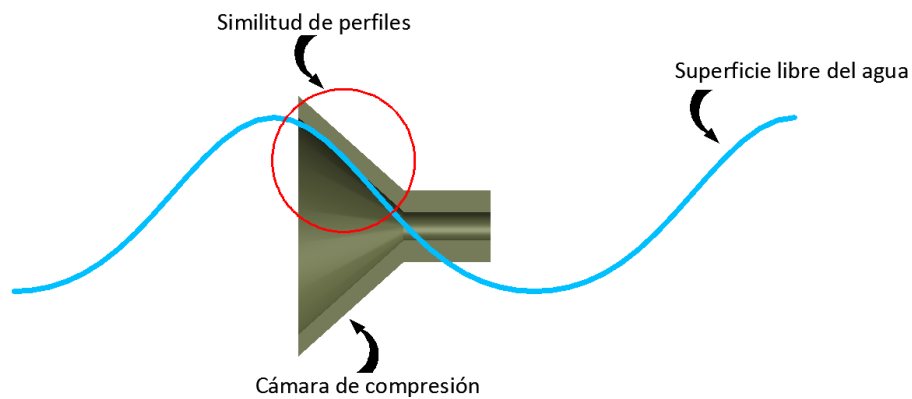


Figura 11 Empalme entre la cámara de compresión y la superficie libre del agua.

Como se mencionó anteriormente, la longitud del dispositivo es un tercio de la longitud de onda de la ola, con altura de ola 2 m, periodo 6 s y profundidad 10 m. Con respecto al diámetro de entrada o mayor del dispositivo es 50 cm más alto que la altura de ola, esto para que entre completamente al dispositivo y evitar que se descrete, el diámetro de salida o menor equivale a 0.3048 m. Siendo el diámetro mayor 7.7 veces más grande, se observó que con relaciones de diámetros cercanas

a 10 se incrementa la posibilidad de presentar reflexión. En la figura 12 se muestra la geometría del primer modelo al que denominamos modelo 1, dicho modelo se muestra en corte longitudinal y sin acotaciones. En el capítulo V se anexan los planos mecánicos de los 16 modelos y del Blow-Jet sometidos a CFD.



Figura 12 Corte longitudinal del modelo 1.

4.3. CFD DE LOS MODELOS CON EL SOFTWARE FLOW-3D

En total se realizaron 18 simulaciones con diferentes geometrías, contando las caracterizaciones del Blow-Jet propuesto por Chávez (2010), Se describen las actividades más representativas para realizar una simulación:

- Diseño y dibujo del modelo en AutoCad.
- Generación de archivo para la simulación en el software FLOW-3D.
- Configuración de la malla 1D, 2D y 3D según lo requiera el caso; y sus demás elementos.
- Configuración de los parámetros de entrada y salida.
- Configurar los elementos frontera y su comportamiento.
- Parametrizar sensores.
- Comprobación de parámetros tanto de entrada como de salida.
- Ejecutar preproceso.
- Ejecutar simulación.
- Revisar reporte de simulación
- Procesado de resultados y elementos de salida (tablas, gráficas, ilustraciones, videos dependiendo los requerimientos del estudio).

- A. Diseño y dibujo del modelo de AutoCad: Se utilizó el software antes mencionado para diseñar, representar, acotar y realizar los ajustes necesarios a los modelos. Las representaciones de los modelos se hicieron en 3D. Para la simulación se requieren los archivos en extensión “stl”. por necesidades de la simulación los modelos se presentan en corte longitudinal.
- B. Generación de archivo para la simulación en el software FLOW-3D: Ejecutamos el software FLOW-3D, se abre el archivo precargado ubicado en File/Add Example/Stokes Surface Wave. Especificar nombre de proyecto y ruta de guardado.
- C. Configuración de la malla 1D, 2D y 3D según lo requiera el caso; y sus demás elementos: Creación de bloques para optimizar el tiempo de simulación dichos bloques pueden ser anidados o contiguos, acotar la malla, importar archivo “stl” del modelo, ubicar el modelo dentro de la malla, especificar resolución de la malla, crear elementos dentro del mallado que nos permitan una mejor representación del caso de estudio. En la figura 7 se puede apreciar la malla, la resolución de la misma y un corte longitudinal del dispositivo undimotiz Blow-Jet.
- D. Configuración de los parámetros de entrada: Se ingresan los parámetros necesarios que requiere el software para la simulación: duración de simulación, paso de tiempo en solvers, unidades con las que trabajará el sistema, densidad, viscosidad del fluido, ingresar gravedad en las unidades pertinentes, número de iteraciones, elegir el tipo de solver y cómo trabaja dicho solver , es decir, implícita o explícitamente; tiempo de reporte de la simulación en tiempo real (para monitoreo de la simulación), tiempo de grabación entre datos del registro, elegir parámetros de salida, velocidades, presiones, alturas de hola, caudales, aceleraciones tanto de la partícula como del fluido, temperatura, dependiendo del tipo de fenómeno que se quiera representar son las variables que se pueden obtener, las antes mencionadas son sólo algunas de las que se pueden adquirir.
- E. Configurar los elementos frontera y su comportamiento: Entiéndase como frontera los límites o planos en la malla y de los bloques que conforman dicha malla, se

determina el comportamiento físico y matemático en cada frontera, límite o plano, es decir, en que frontera inicia el fluido, si una frontera actúa como límite físico, es continuista o de propagación por mencionar algunos; y sus características como altura de ola, periodo, longitud de onda como ejemplo.

- F. Parametrizar sensores: Se pueden ubicar sensores en cualquier punto de la malla, que presenta una gran ventaja de obtener datos que no es posible adquirir en modelos físicos por factores de equipo, entorno físico, económicas etcétera. La información resultante de dichos sensores depende de los parámetros configurados que se hayan determinado.
- G. Comprobación de parámetros tanto de entrada como de salida: Ya que la duración de ejecución en tiempo de cómputo de los modelos numéricos puede tener una duración de días y omitir algún parámetro comúnmente resulta que la simulación sea errónea. Se recomienda revisar exhaustivamente los parámetros que se ingresaron tanto de salida como de entrada.
- H. Ejecutar preproceso. Dicha tarea realiza una revisión física y matemática de posibles fallos que pudieran ocurrir en la simulación y expone recomendaciones para corregirlos.
- I. Ejecutar simulación: Correr el proceso de simulación.
- J. Revisar reporte de simulación: Se recomienda revisar el reporte que se genera en tiempo real, algunas recomendaciones se pueden aplicar en tiempo real, sin tener la necesidad de pausar o parar la simulación.
- K. Procesado de resultados y elementos de salida: Se generan las tablas, gráficas, scripts o videos de las variables deseadas y de cuantos sensores se hayan colocado, dependiendo si es un caso 1D, 2D o 3D son los tipos de resultados a obtener, por ejemplo en 3D se pueden generar todos los productos y en el corte que se desee. La figura 13 muestra un instante en el tiempo de una simulación.



Figura 13 Muestra un script en el tiempo de una simulación.

4.4. PRUEBAS DE LABORARIO DEL MODELO 10

El modelo 10 mostró mejor desempeño hidrodinámico, y valores más altos promedios y máximos en velocidad y presión a la salida del dispositivo, conforme a los resultados de las simulaciones que se presentan en el capítulo V. La figura 14 muestra un corte longitudinal del modelo 10 el cual será sometido a pruebas en el canal de oleaje por las razones recién mencionadas cabe recalcar que los resultados de las pruebas de laboratorio también serán expuestos en el capítulo V.

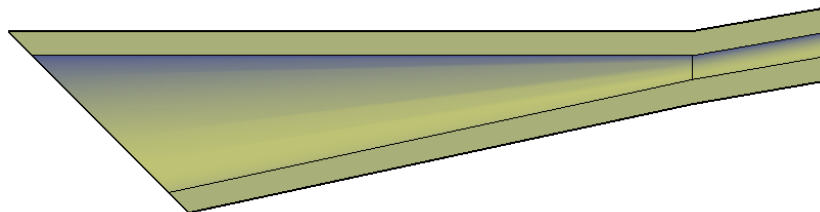


Figura 14 Corte longitudinal del modelo 10.

1. Se diseñó el siguiente programa de ensayos tabla 6, en total se realizaron 78 pruebas, de las cuales 26 corresponde a la medición de la presión, 26 a la velocidad y el resto al volumen a la salida del dispositivo.

Tabla 6 Relación de ensayos.

PRESIÓN, VELOCIDAD Y VOLUMEN						
SENSORES	PRUEBA	TEORÍA	H (m)	T (s)	h (m)	t (min)
8 SENSORES DE NIVEL, 1 SENSOR DE VELOCIDAD, 1 SENSOR DE PRESIÓN	1	Stokes 2º orden	0.1	1.34164	0.5	30
	2	Stokes 2º orden	0.1	1.34164	0.5	30
	3	Stokes 2º orden	0.12	1.4	0.5	30
	4	Stokes 2º orden	0.12	1.6	0.5	30
	5	Stokes 2º orden	0.12	1.8	0.5	30
	6	Stokes 2º orden	0.12	2	0.5	30
	7	Stokes 2º orden	0.1	2	0.5	30
	8	Stokes 2º orden	0.1	1.6	0.5	30
	9	Stokes 2º orden	0.1	1.8	0.5	30
	10	Stokes 2º orden	0.1	2.24	0.5	30
	11	Stokes 2º orden	0.1	2.68	0.5	30
	12	Stokes 2º orden	0.12	2.24	0.5	30
	13	Stokes 2º orden	0.12	2.68	0.5	30
	1	JONSWAP	0.1	1.34164	0.5	30
	2	JONSWAP	0.1	1.34164	0.5	30
	3	JONSWAP	0.12	1.4	0.5	30
	4	JONSWAP	0.12	1.6	0.5	30
	5	JONSWAP	0.12	1.8	0.5	30
	6	JONSWAP	0.12	2	0.5	30
	7	JONSWAP	0.1	2	0.5	30
	8	JONSWAP	0.1	1.6	0.5	30
	9	JONSWAP	0.1	1.8	0.5	30
	10	JONSWAP	0.1	2.24	0.5	30
	11	JONSWAP	0.1	2.68	0.5	30
	12	JONSWAP	0.12	2.24	0.5	30
	13	JONSWAP	0.12	2.68	0.5	30

- Las pruebas de laboratorio se realizaron en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, con dimensiones de 37 m de largo, 0.8 m de ancho y 1.20 m de alto la figura 15 y 16, se muestran fotografías del canal.



Figura 15 Canal de oleaje.



Figura 16 Fotografía del canal de oleaje en toda su longitud.

4.5. FABRICACIÓN DEL MODELO10

1. Se imprimió el modelo 10 a una proporción de 1:20 bajo la condición de Froude, para ello se utilizó la impresora 3D ULTIMAKER 2 EXTENDED +. En la tabla 7 se muestran las especificaciones técnicas de la impresora, la figura 17 muestra la impresora.

Tabla 7 Propiedades de impresora e impresión.

IMPRESORA Y PROPIEDAS DE LA IMPRESIÓN	
Tecnología de impresión	Fused Filament Fabrication (FFF)
Cabezal de impresión	Boquilla intercambiable
Volumen de impresión	223x223x305 mm
Diámetro del filamento	2.85 mm
Resolución de capas	Boquilla 0.25 mm: 150 a 60 micrones
	Boquilla 0.4 mm: 200 a 20 micrones
	Boquilla 0.6 mm: 400 a 20 micrones
	Boquilla 0.8 mm: 600 a 20 micrones
Precisión X, Y, Z	12.5, 12.5, 5 micrones
Velocidad de desplazamiento del cabezal	30 a 300 mm/s
Velocidad de extrusión	Boquilla 0.25 mm: hasta 8 mm ³ /s
	Boquilla 0.4 mm: hasta 16 mm ³ /s
	Boquilla 0.6 mm: hasta 23 mm ³ /s
	Boquilla 0.8 mm: hasta 24 mm ³ /s
Placa de impresión	Plataforma calefactada (20° 100° C)
Materiales de soporte	PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, Nylon, TPU 95A (Sistema de filamento abierto)
Diámetro de tobera	0.25, 0.4, 0.6, 0.8 mm
Temperatura de boquilla	180° a 260° C
Temperatura de plataforma caliente	50° a 100° C
Tiempo de calentamiento de la boquilla	~ 1 min
Tiempo de calentamiento de la plataforma	< 4 min
Ruido operativo medio	50 dBA
Transferencia de fichero	Impresión 3d independiente desde la tarjeta SD
Nivelación de la plataforma	Manual, asistida
DIMENSIONES FÍSICAS	
Dimensiones (excluyendo el tubo bowden y el porta carretes)	257x342x488 mm
Dimensiones (incluyendo el tubo bowden y el porta carretes)	493x342x688 mm

Peso neto	12.3 kg
Peso de transporte	19.5 kg
REQUISITOS DE POTENCIA	
Entrada	100-240 V
	4 A, 50-60 Hz
	221 W max.
Salida	24 V DC, 9.2 A
CONDICIONES DE AMBIENTE	
Temperatura ambiental de funcionamiento	15° a 32° C
Temperatura en paro	0° a 32° C
SOFTWARE	
Preparación para impresión	Cura-Oficial Ultimaker Software
Sistema operativo soportado	Mac OS X, Windows, Linux
Tipos de archivo	STL, OBJ, DAE



Figura 17 Impresora 3D Ultimaker 2 Extended +

- El modelo 10 se imprimió en tres secciones, para realizar el ensamble de dichas secciones se diseñaron juntas cónicas, la unión se realizó con pegamento para PVC, ya que el material de impresión tiene características similares, una vez ensamblado el modelo 10, las uniones se impermeabilizaron con silicón, en la figura 18 se muestra el proceso de impresión.

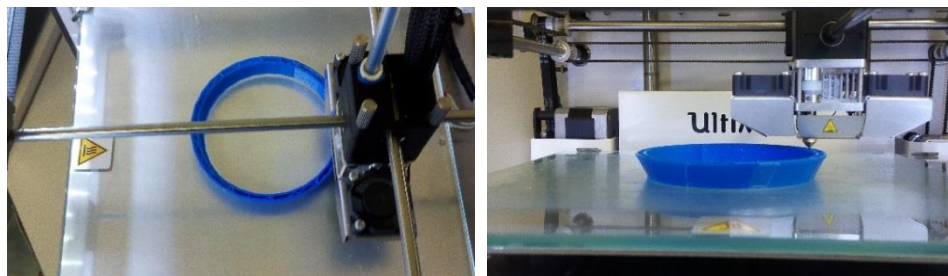


Figura 18 Proceso de impresión del modelo 10.

Una vez que secaron las uniones y se vulcanizó el silicón, el modelo 10 se montó en un arnés de aluminio para emplazarlo en el canal de oleaje, la figura 19 muestra el montaje en el arnés de aluminio.



Figura 19 Modelo 10 montando en el arnés de aluminio.

Los planos mecánicos para la impresión de la sección 1, 2, y 3 del modelo 10 se muestran en el capítulo V.

4.6. PRUEBAS EN EL CANAL DE OLEAJE

En las 78 pruebas realizadas se utilizaron 8 sensores de nivel para determinar la superficie libre del agua. Se calculó el espaciamiento entre sensores con las siguientes expresiones: distancia mínima entre sensores [15] y distancia máxima [16].

$$\Delta_{min} = \frac{\pi}{10k} \quad [15]$$

$$\Delta_{max} = \frac{9\pi}{10k} \quad [16]$$

Donde:

- Δ_{min} = Distancia mínima.
- Δ_{max} = Distancia máxima.
- k = Número de onda
- π = Pi = 3.141592

En la tabla 8 se muestra las Δ_{min} y Δ_{max} para los ensayos realizados.

Tabla 8 Δ_{min} y Δ_{max} para los ensayos realizados.

DISTANCIA ENTRE SENSORES (cm)	PRUEBAS												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Δ_{min}	12	12	12	20	20	20	20	20	20	28	28	28	28
Δ_{max}	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87

En la figura 20 y figura 21, se muestra un sensor de nivel y distancia entre sensores respectivamente.



Figura 20 Sensor de nivel.

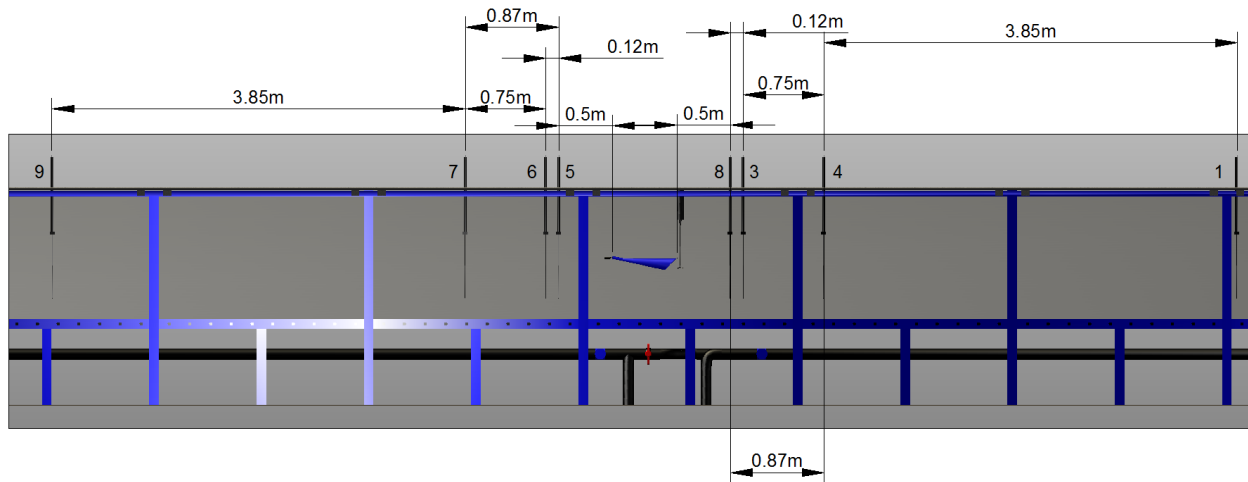


Figura 21 Distancia entre los sensores de nivel y su acomodo.

La calibración, medición y adquisición de datos se realizó con el sistema imc SPARTAN, dicho sistema consta de consola y dos paquetes de software imc STUDIO e imc FAMOUS, además de dicho sistema se requiere de gabinetes donde conectar los sensores de nivel. La figura 22 muestra la consola del sistema imc SPARTAN, la figura 23 presenta los gabinetes para conectar y modular los sensores de nivel.



Figura 22 Consola del sistema imc SPARTAN.



Figura 23 Gabinetes para conectar los sensores de nivel.

4.7. PRUEBAS PARA EL REGISTRO DE LA PRESION A LA SALIDA DEL MODELO 10

El registro de la presión se obtuvo con un transmisor piezoresistivo PR-36X de la marca Keller Druck figura 24. Para la adquisición de datos se utilizó nuevamente el sistema imc SPARTAN. Se posiciona el sensor del transmisor justo a la salida del modelo 10:



Figura 24 Sensor de presión.

La sonda está basada en un transductor piezoresistivo y un microprocesador con un convertidor A/D de 16 bits integrado. Las derivas por temperatura, así como la no linealidad del sensor, han sido compensadas matemáticamente. En la tabla 9 se muestran las especificaciones del sensor de presión.

Tabla 9 Especificaciones del sensor de presión.

ESPECIFICACIONES					
	Solo digital	Digital	Analógico	Analógico	Analógico
Salida	RS 485	SDI-12	4...20 mA	0...10 V	0...5 V
Alimentación (U)	8...32 V	6...32 V	8...32 V	13...32 V	8...32 V
Precisión	0.025 % FE	0.05 % FE	0.05 % FE	0.05 % FE	0.05 % FE
Banda de error	0.2 % FE	0.2 % FE	0.2 % FE	0.2 % FE	0.2 % FE
Interfaz		RS 485	RS 485	RS 485	RS 485
Consumo de corriente	< 8 mA	<0.1 mA/5 mA	3.2, ..., 22.5 mA	< 8 mA	< 8 mA

4.8. PRUEBAS PARA EL REGISTRO DE LA VELOCIDAD A LA ENTRADA DEL MODELO 10

El registro de la velocidad se llevó a cabo con un velocímetro acústico Doppler (Vectrino) figura 25. Funciona enviando un corto pulso acústico desde un transductor activo. Cuando el pulso atraviesa el punto a donde se orientan los transductores pasivos, el eco es registrado por cada uno de ellos. Estas señales son procesadas para determinar sus desviaciones Doppler. Se presentan a continuación sus especificaciones generales en la tabla 10.



Figura 25 Velocímetro acústico Doppler (Vectrino).

Tabla 10 Especificaciones del velocímetro acústico Doppler.

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL AGUA	
Rango	±0.01, 0.1, 0.3, 1, 2, 4 m/s
Precisión	±1% del valor medido ± 1 mm/s
Tasa de muestreo (salida)	1-25 Hz firmware estándar
	1-200 Hz firmware plus
VOLUMEN DE MUESTREO	

Distancia hasta la sonda	0.05 m
Diámetro	6 mm
Altura	3-15 mm
INTENSIDAD DEL ECO	
Frecuencia acústica	10 MHz
Resolución	Escala lineal
Rango dinámico	25 dB
SENSORES	
Temperatura	Termistor integrado en la sonda
Rango	-4° C a 32° C
Precisión/Resolución	1° C/0.1° C
Tiempo de respuesta	min
COMUNICACIÓN DE DATOS	
I/O	RS 232. El software soporta los convertidores comerciales disponibles USB-RS 232
Rango de velocidad de comunicación	300-115 200 Baudios
Control de usuario	Software o línea de comando
Salida análoga	3 canales estándar, uno por cada componente de la velocidad
Rango de salida	0-5 V, escalada manualmente
Sincronización	SynchIn y synchOut
OPERACIÓN MULTIUNIDAD	
Software	Polysinc
I/O	RS 232-USB soporte para 1, 2, 4, y 8 puertos seriales
SOFTWARE ("VECTRINO")	
Sistema Operativo	Windows XP, Windows 7
Funciones	Configuración del instrumento, recopilación de datos, almacenamiento de datos. Modos de prueba para la sonda
FUENTE DE ALIMENTACIÓN	
Salida DC	12-48 VDC
Energía pico	2.5 A a 12 VDC
Consumo máximo	200 Hz 1.5 W
CONECTORES	
Bulkhead	MCBH-12-FS, bronce (impulso)
Cable	PMCIL-12-MP
MATERIALES	
Modelo estándar	Carcasa Delrin, sonda y tornillos de acero inox.
CONDICIONES AMBIENTALES	
Temperatura de operación	-4° C a 40° C

Temperatura de almacenaje	-15° C a 60° C
Impacto y vibración	IEC 721-3-2

4.9. PRUEBAS PARA EL AFORO DEL VOLUMEN A LA ENTRADA DEL MODELO 10 PARA LA OBTENCIÓN DEL GASTO

El gasto se obtuvo de forma indirecta, se acondicionó una probeta para realizar el aforo del volumen de agua en lapsos de tiempo de muestreo. Los lapsos de tiempo de muestreo varían según la prueba realizada, a causa del periodo y la altura de ola de dicha prueba. En la figura 26 se muestra la probeta acondicionada con la que se aforó el volumen a la salida del modelo 10.



Figura 26 Probeta acondicionada para el aforo.

Capítulo V

5. RESULTADOS

El análisis de los datos obtenidos de las simulaciones, los resultados y productos de: pruebas de laboratorio, escalado de modelo, análisis de oleaje, se realizaron con los siguientes softwares AutoCAD, Microsoft Excel, FLOW-3D y por medio de scripts desarrollados en MATLAB, que llevan por nombre: temporal, espectral, presión, velocidad, volumen, stokescorrecto, F.A y datos_graph; se exponen en el presente capítulo.

5.1. SIMULACIONES

A continuación, se presentan las dos simulaciones realizadas del dispositivo undimotriz Blow-Jet dichas simulaciones se realizaron con la finalidad de caracterizar el desempeño del dispositivo, se utilizaron como parámetros de entrada los valores empleados por Chávez (2010) de las pruebas 143 y 255 que son las pruebas que arrojaron valores más altos de velocidad a la salida del dispositivo Blow-Jet. Los parámetros de entrada de la prueba 143 y para la simulación 1 del Blow-Jet:

- Altura de ola $H = 0.08$ m.
- Periodo $T = 1.2$ s.
- Profundidad $d = h = 0.64$ m.
- Inclinación $I = 10^\circ$.
- Sumergencia $S = 1/2$ del diámetro interior del dispositivo

Los parámetros de entrada de la prueba 255 y para la simulación 2 del Blow-Jet.

- Altura de ola $H = 0.08$ m.
- Periodo $T = 1.2$ s.
- Profundidad $d = h = 0.7$ m.

- Inclinación $I = 10^\circ$.
- Sumergencia $S = 2/3$ del diámetro interior del dispositivo.

Una vez realizadas las simulaciones para caracterizar el dispositivo undimotriz Blow-Jet se realizaron simulaciones de los 16 modelos diseñados.

5.1.1. SIMULACIÓN 1 DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET

Se conformó una malla con seis bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-05}$ s con un tiempo de simulación de 30 s. La malla es de 400 cm de largo por 23.3 cm de ancho y 100 cm de alto. A una profundidad de 64 cm y con una sumergencia de un medio del diámetro interior del dispositivo, se colocaron sensores de velocidad y presión a la entrada y salida del Blow-Jet. La figura 27 muestra una ilustración en el tiempo de la simulación 1 del Blow-Jet.

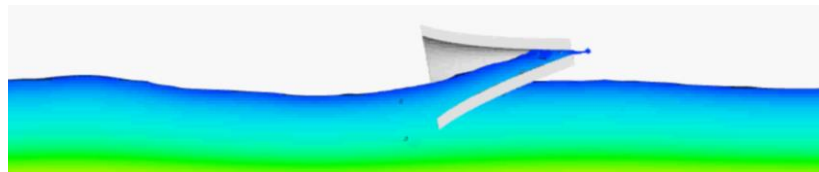


Figura 27 Ilustración de la simulación 1 del Blow-Jet.

Presenta alta reflexión durante toda la simulación, las gráficas de la figura 28 de velocidad y presión muestran valores con tendencia media alta al inicio y final de la simulación, a la mitad de la corrida se presentan valores bajos en velocidad y presión, debido principalmente a la reflexión que interfiere con el oleaje en la entrada. La figura 29 muestra el plano mecánico del dispositivo undimotriz Blow-Jet.

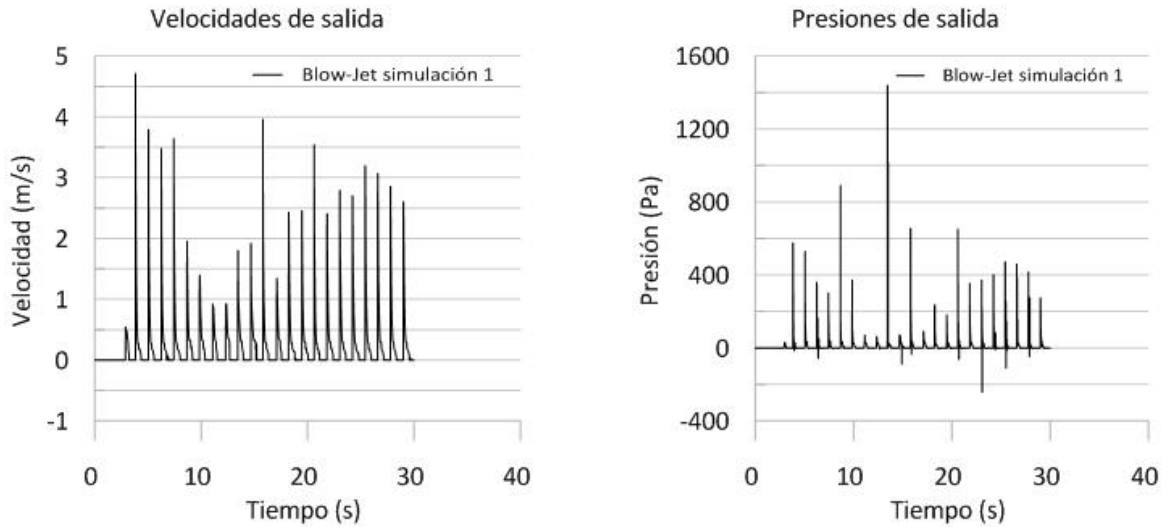


Figura 28 Gráficas de velocidad y presión del dispositivo undimotriz Blow-Jet.

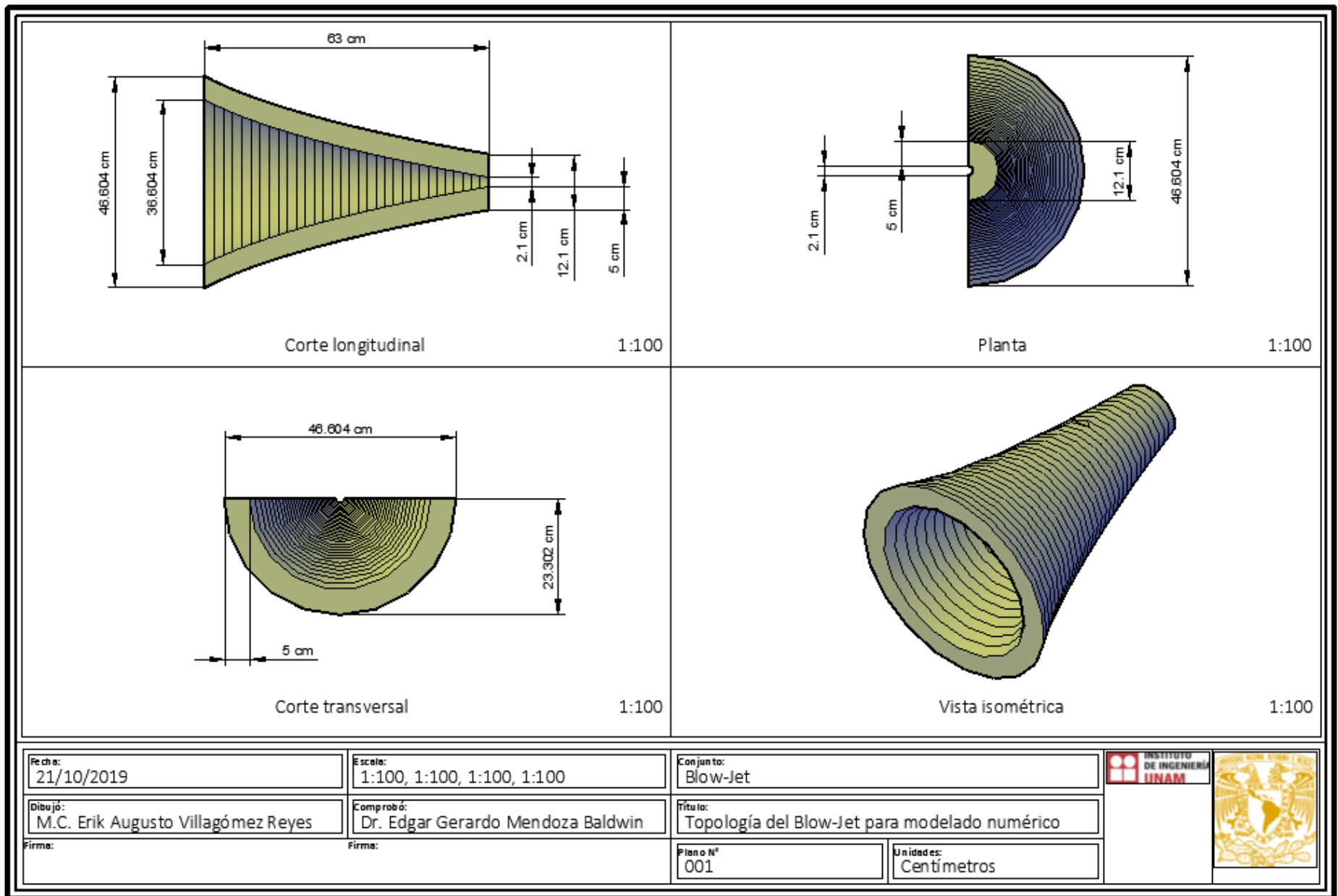


Figura 29 Plano mecánico del dispositivo undimotriz Blow-Jet.

5.1.2. SIMULACIÓN 2 DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET

Se conformó una malla con cinco bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-04}$ s y un tiempo de simulación de 60 s. La malla es de 600 cm de largo por 23.3 cm de ancho y 110 cm de alto. A una profundidad de 70 cm y con una sumergencia de dos tercios del diámetro interior del dispositivo, se colocaron sensores de velocidad y presión a la entrada y salida del Blow-Jet. La figura 30 muestra un gráfico en el tiempo de la simulación 2 del Blow-Jet.

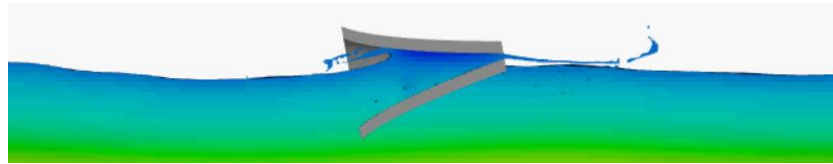


Figura 30 Gráfico de la simulación 2 del Blow-Jet.

Presenta reflexión durante toda la simulación, debido a la inclinación y a la sumergencia, presenta valores con tendencia media-alta de velocidad, en cambio la presión presenta valores con tendencia media-baja como se puede apreciar en las gráficas de la figura 31, la presente simulación es con el mismo dispositivo undimotriz Blow-Jet, en esta simulación no hubo cambio alguno en la geometría por lo cual corresponde la misma geometría (figura 29) de la simulación anterior.

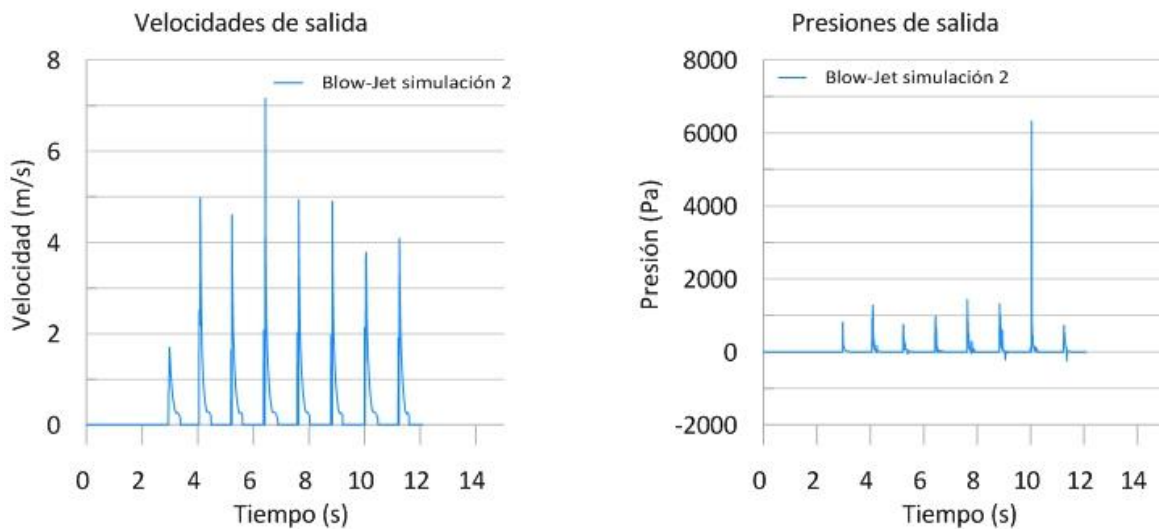


Figura 31 Gráficas de velocidad y presión de la simulación 2 del Blow-Jet.

5.1.3. SIMULACIÓN DEL MODELO 1

El resultado de la conceptualización del rediseño del dispositivo undimotriz Blow-Jet se aprecia en la figura 32 dicho rediseño lleva por nombre modelo 1; como se menciona en el capítulo IV apartado 4.2. Se importa el modelo 1 en corte longitudinal al software FLOW-3D se ingresan los parámetros de entrada. Para la simulación del modelo 1 se conformó una malla con 5 bloques con resoluciones de 6, 10 y 18 cm con un paso de tiempo de $1E^{-06}$ s con un tiempo de simulación de 15 s. La malla es de 5000 cm de largo por 450 cm de ancho por 1300 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un medio del dispositivo, se colocaron sensores para registrar velocidades y presiones a la entrada y salida del dispositivo, en la figura 33 muestra una ilustración que es un instante en el tiempo de la simulación del modelo 1. Una vez concluida la simulación se obtienen datos en crudo o rawdata se procesan dichos datos los cuales se muestran en la figura 34

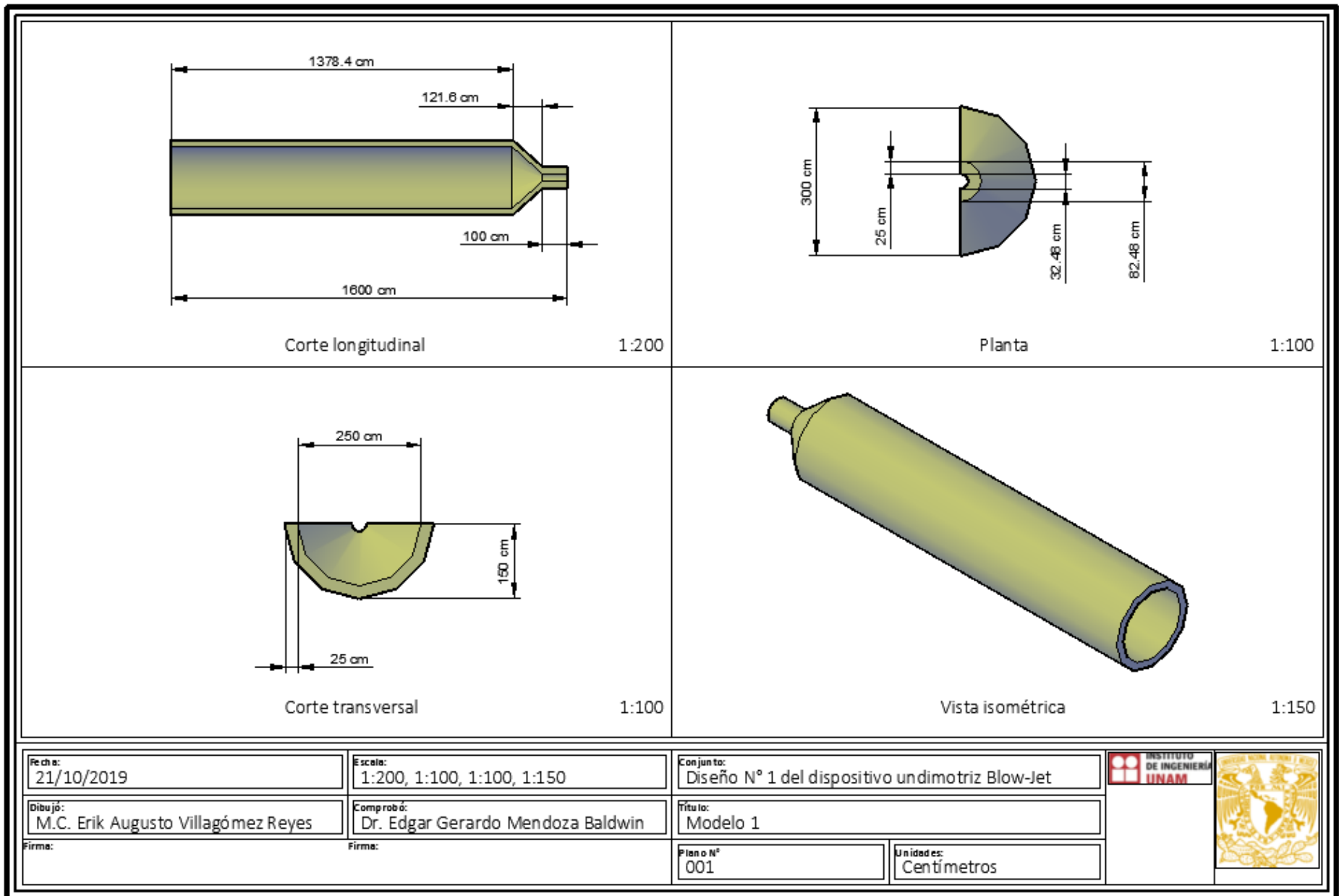


Figura 32 Plano mecánico del modelo 1 sometido a CFD

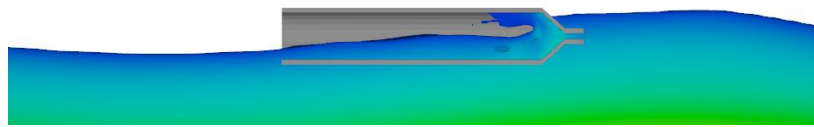


Figura 33 Ilustración de la simulación del modelo 1.

En la ilustración se aprecia que la salida del dispositivo se presenta ahogada, hay reflexión, rotura de la ola al interior del dispositivo, baja potencia del chorro de salida, hay rebase de la ola, en la salida del dispositivo hay entrada de agua. Como se pudo observar el diseño presenta varios problemas, por ello, se propone alargar la cámara de compresión, y disminuir el perímetro mojado o elevar la cota hidráulica. Se procesan y grafican los datos de los sensores. La gráfica de velocidad y presión de la figura 34 es a la salida del modelo 1, se puede observar que las valores de velocidades son bajos, no así en la gráfica de presiones en la que se aprecian valores altos pero de hecho son menores que a la entrada del dispositivo, esto significa que la ola con estos parámetros $T = 6$ s, $H = 2$ m y $h = 10$ m tiene un rango medio entre 6500 Pa y 7000 Pa.

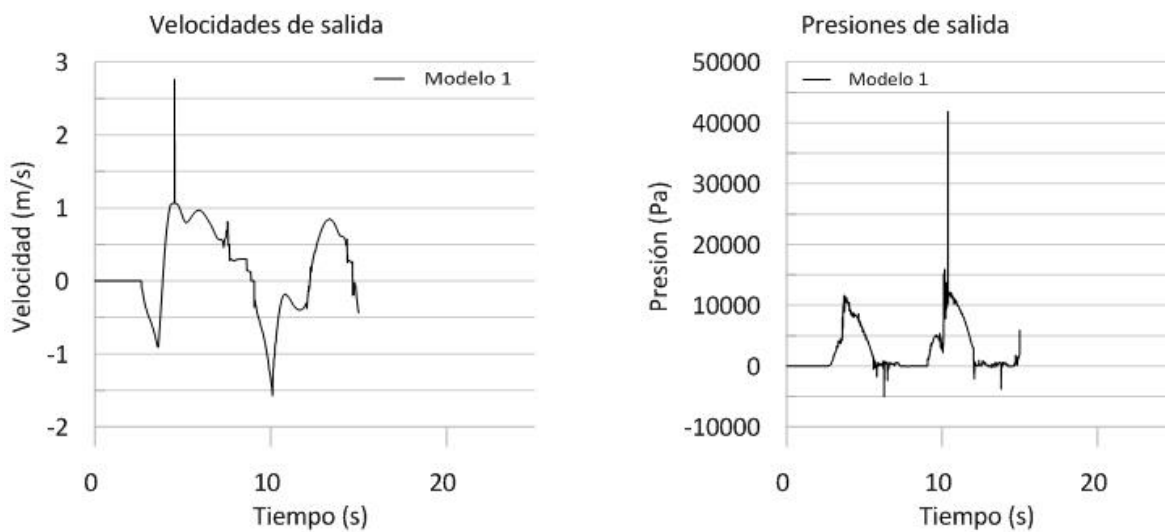


Figura 34 La gráfica de la izq. muestra la velocidad a la salida, a la der. se tiene la presión a la salida del modelo 1.

5.1.4. SIMULACIÓN DEL MODELO 2

Se conformó una malla con tres bloques para acelerar la simulación, con un paso de tiempo de $1E^{-06}$ s con un tiempo de simulación de 30 s. La malla es de 9600 cm de largo por 450 cm de ancho y 1300 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un medio del dispositivo, se colocaron sensores de velocidad y presión a la entrada y salida del modelo 2. La figura 35 muestra un instante en el tiempo de la simulación.

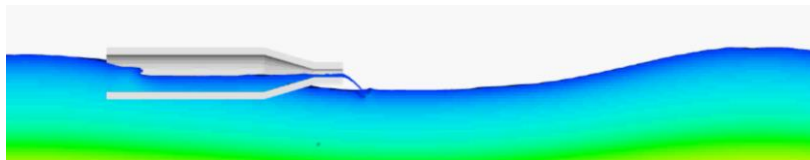


Figura 35 Instante en el tiempo de la simulación del modelo 2.

La simulación presenta rotura en la cámara de compresión, reflexión dentro del dispositivo, el chorro de salida se presenta ahogado, al arribo de la tercera ola hay rebase, por ello se propone reubicar la salida a la parte superior de dispositivo, aumentar el diámetro de entrada 100 cm, inclinar el dispositivo 5 grados con respecto al eje de las abscisas, elevar la cota hidráulica a un tercio del diámetro interior de entrada del dispositivo. La figura 36 muestra las velocidades y presiones a la salida del modelo 2 las velocidades se aprecian ligeramente mayores que las del modelo 1, con respecto a las presiones también muestran un ligero incremento, se puede observar en el segundo 17 se presenta un pico positivo tanto en velocidades como en presiones, esto debido a la misma naturaleza del movimiento, ya que es un movimiento armónico regular y el dren del mallado no propaga hacia infinito hasta la inclusión en el mallado del ítem denominado wave absorbing, y al no propagar la totalidad de la ola presenta reflexión y la presión al no ser un vector el sensor al tener dos valores en el mismo instante suma o acumula ese registro. El incluir el ítem wave absorbing resuelve el problema de propagar el oleaje y

eliminar los picos, pero emplearlo ocupa espacio de mallado por tanto aumentaría el tamaño de la malla e incrementaría el tiempo de computo por ello su inclusión es a criterio de desempeño/tiempo. La figura 37 muestra el plano mecánico del modelo2.

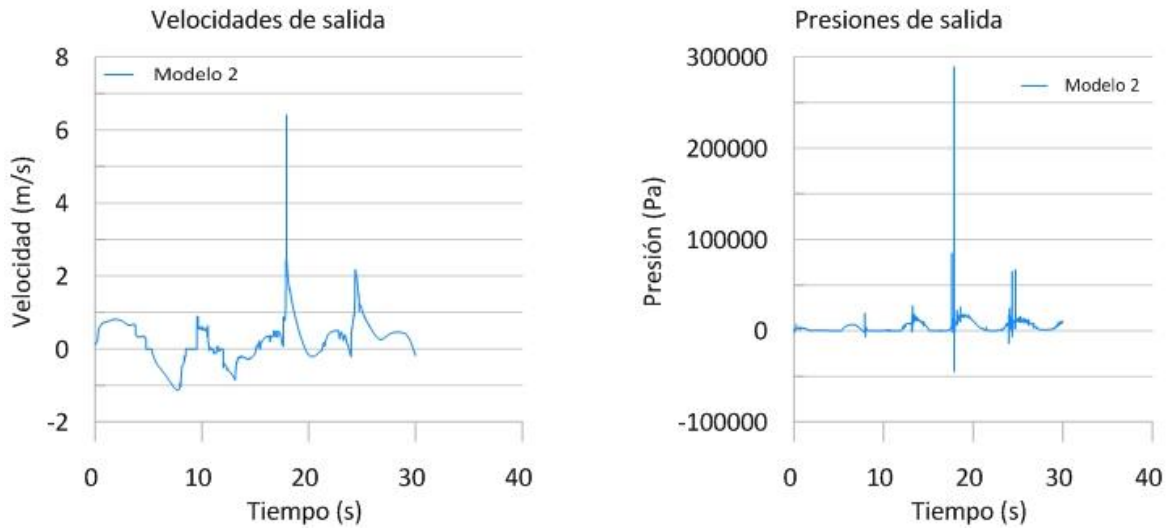


Figura 36 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 2.

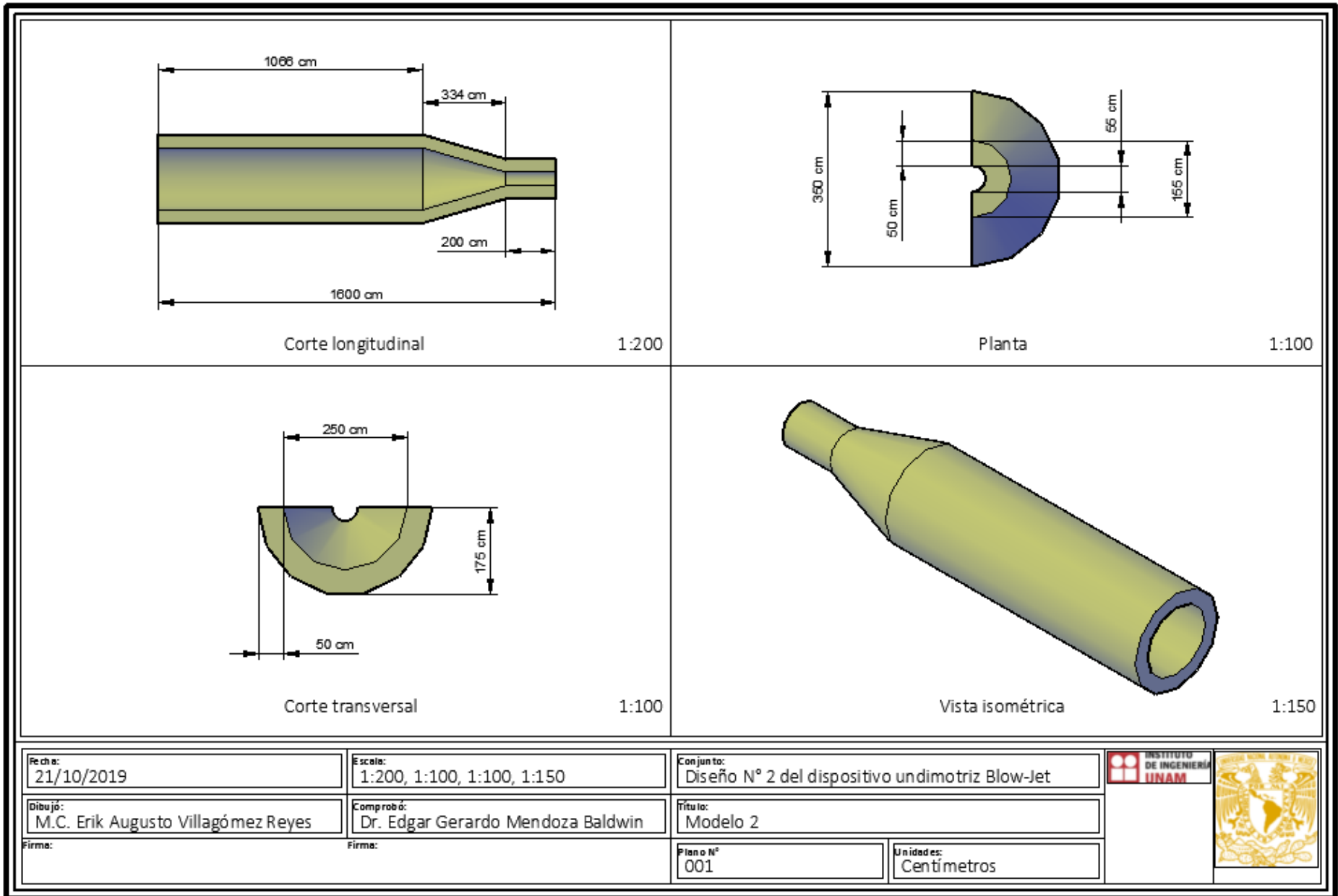


Figura 37 Plano mecánico del modelo 2 sometido a CFD.

5.1.5. SIMULACIÓN DEL MODELO 3

Se utilizó una malla con tres bloques, ya que la simulación fue más rápida en la simulación pasada, con un paso de tiempo de $1E^{-06}$ s con un tiempo de simulación de 30 s. La malla es de 9600 cm de largo por 525 cm de ancho y 1600 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un tercio del diámetro interior de entrada del dispositivo. La figura 38 muestra un gráfico de la simulación del modelo 3.

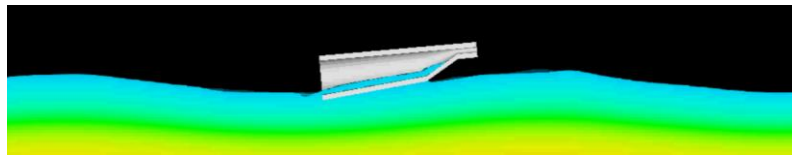


Figura 38 Gráfico de la simulación del modelo 3.

No hay presencia de chorro a la salida, la ola solo alcanza el umbral de salida, la pendiente es muy pronunciada, hay reflexión e induce rotura de la ola a la entrada del dispositivo. Debido a lo antes mencionado se eliminará la inclinación del dispositivo con respecto al eje de las abscisas, a sólo inclinar la salida que es la sección que trabaja a tubo lleno. En la figura 39 se muestran las gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 3, se refleja en la gráfica de velocidad que la ola solo moja el sensor y registra el regreso del flujo. La figura 40 muestra el plano mecánico del modelo 3.

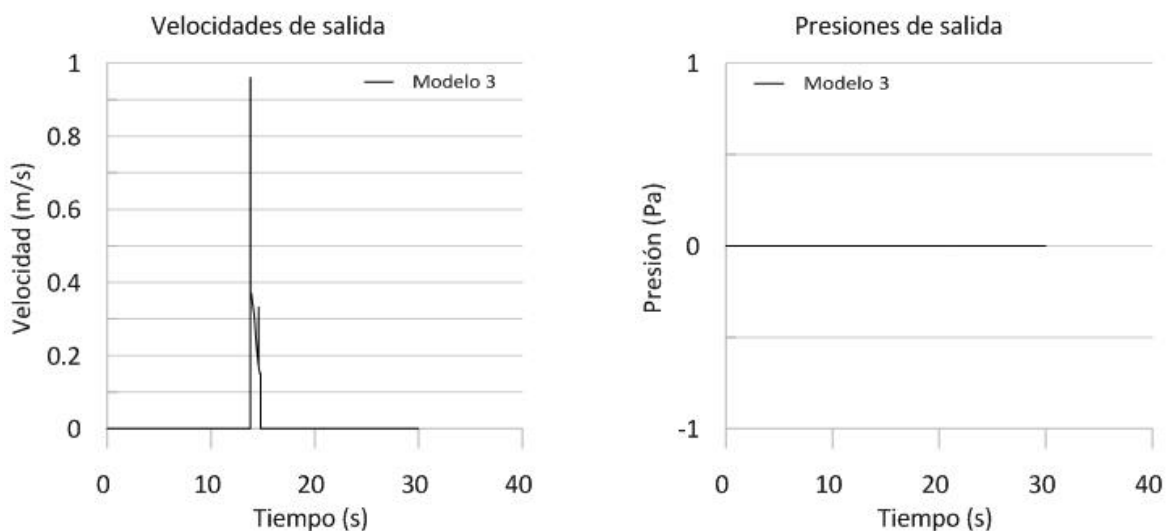


Figura 39 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 3.

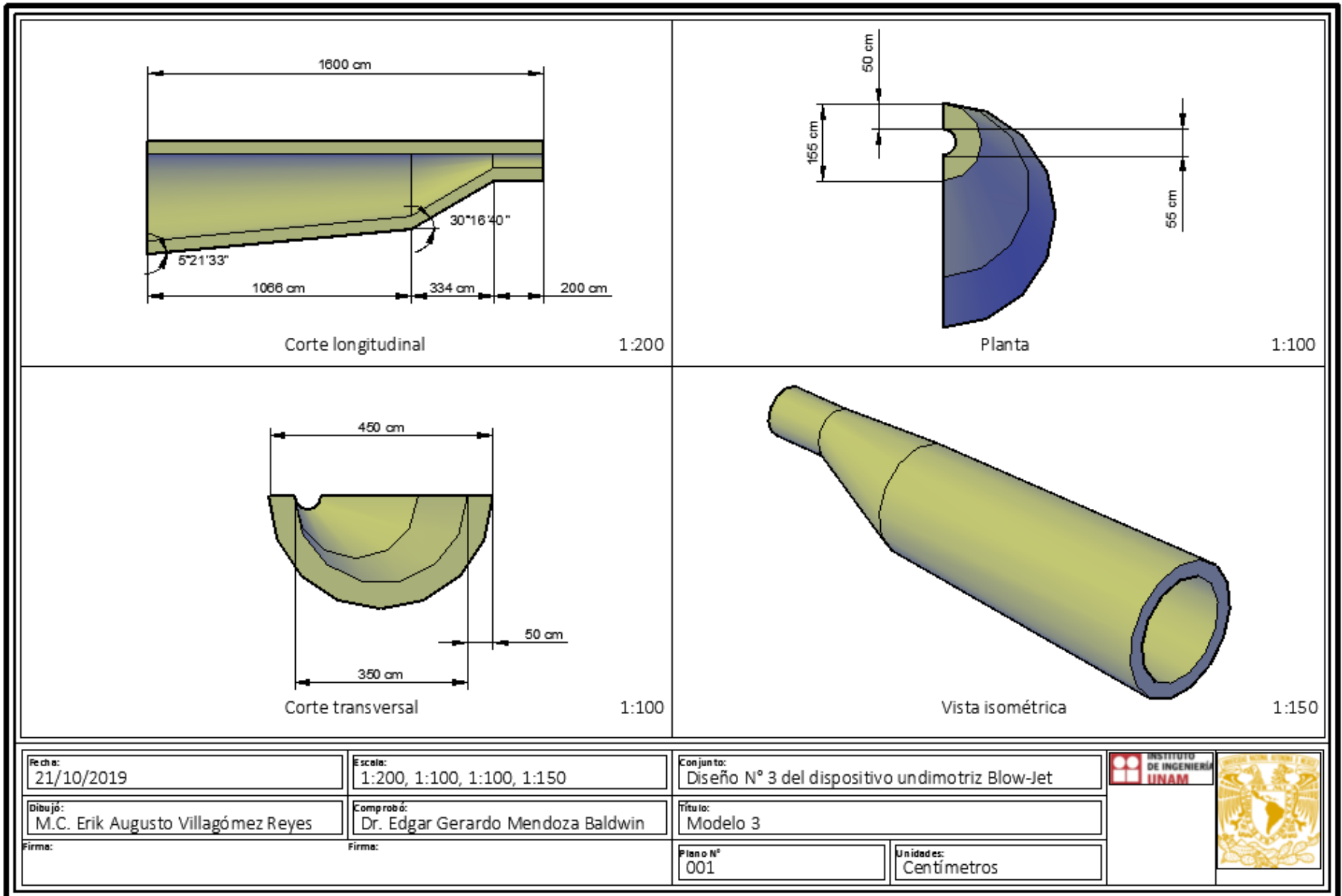


Figura 40 Plano mecánico del modelo 3 sometido a CFD.

5.1.6. SIMULACIÓN DEL MODELO 4

La malla se conforma de tres bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-06}$ s con un tiempo de simulación de 30 s. La malla es de 9600 cm de largo por 525 cm de ancho y 1600 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un tercio del diámetro interior de entrada del dispositivo, además se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. En la figura 41 se muestra el gráfico de la simulación del modelo 4.

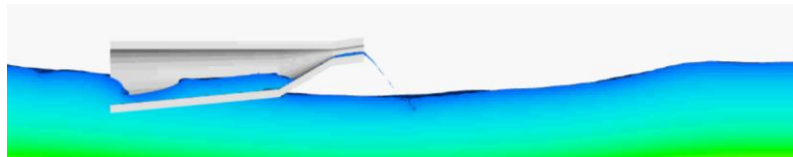


Figura 41 Gráfico de la simulación del modelo 4.

La simulación 4 presenta rotura de la ola en la zona de captación, transito lento del remanente y rotura al final de la sección que trabaja como cámara de compresión, debido a esto se proponen los siguientes cambios, alargar la cámara de compresión hasta alcanzar la longitud de 867 cm de largo adosar una concavidad en los últimos 200 cm de la cámara de compresión, para aumentar la presión y tratar de evitar la rotura que se presenta en la simulación anterior. En la figura 42 se muestran las gráficas de velocidad y presión, del sensor situado en la salida del dispositivo. La figura 43 presenta el plano mecánico del modelo 4.

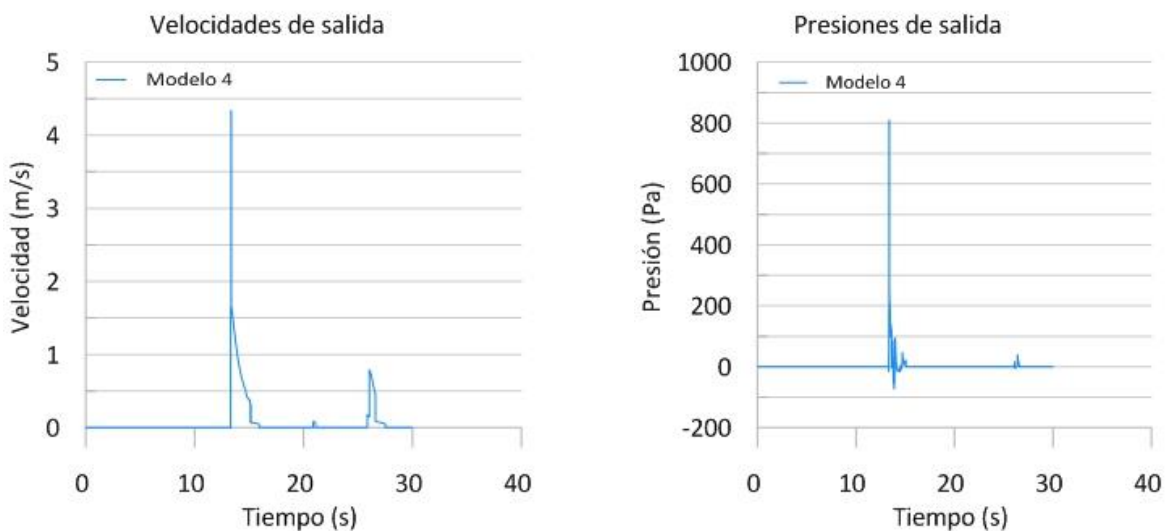


Figura 42 Gráficas de velocidad y presión de la simulación del modelo 4.

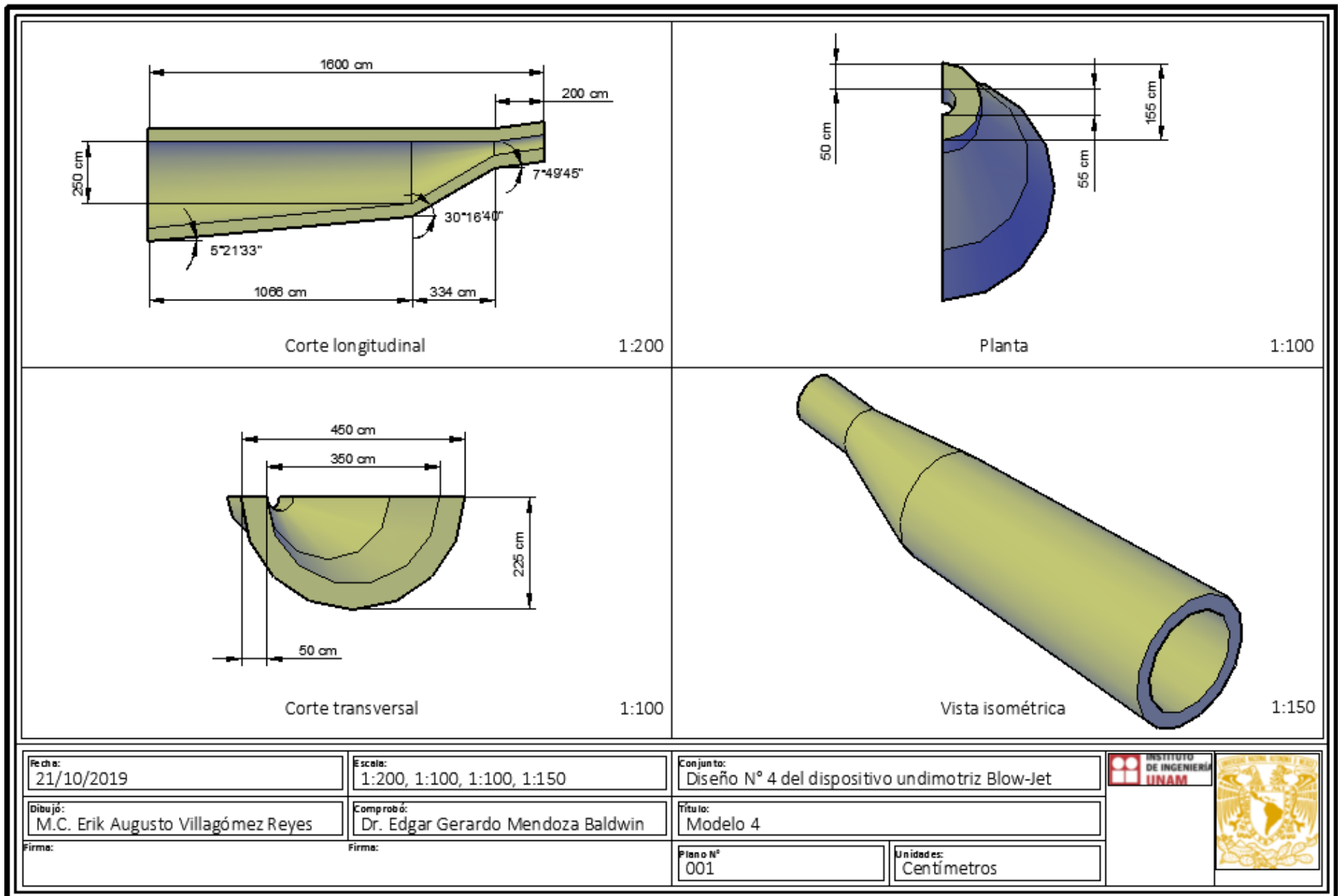


Figura 43 Plano mecánico del modelo 4 sometido a CFD.

5.1.7. SIMULACIÓN DEL MODELO 5

Se conforma una malla de tres bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 60 s. La malla es de 9600 cm de largo por 525 cm de ancho y 1600 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un tercio del diámetro interior de entrada del modelo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. La figura 44 muestra una ilustración de la simulación del modelo 5.

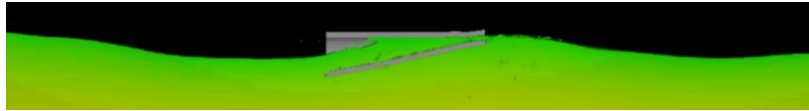


Figura 44 Ilustración de la simulación se adosó una concavidad en la salida del modelo.

En este caso se presenta rotura en la zona de captación, desalojo del remanente más rápido, salida parcialmente ahogada, rebase inminente por consiguiente se realizaron los siguientes cambios, aumentar la cota hidráulica 10 cm. Al alargar la salida 50 cm, se disminuye la inclinación del tubo con respecto al eje de las abscisas, se incrementa la altura de la concavidad de la cámara de compresión. En la figura 45 se muestran las gráficas de velocidad y presión se puede observar en ambas gráficas que el flujo de salida empieza a tener una tendencia armónica, esto se debe a que dicho flujo solo se presenta en una dirección. El plano mecánico del modelo 5 se presenta en la figura 46.

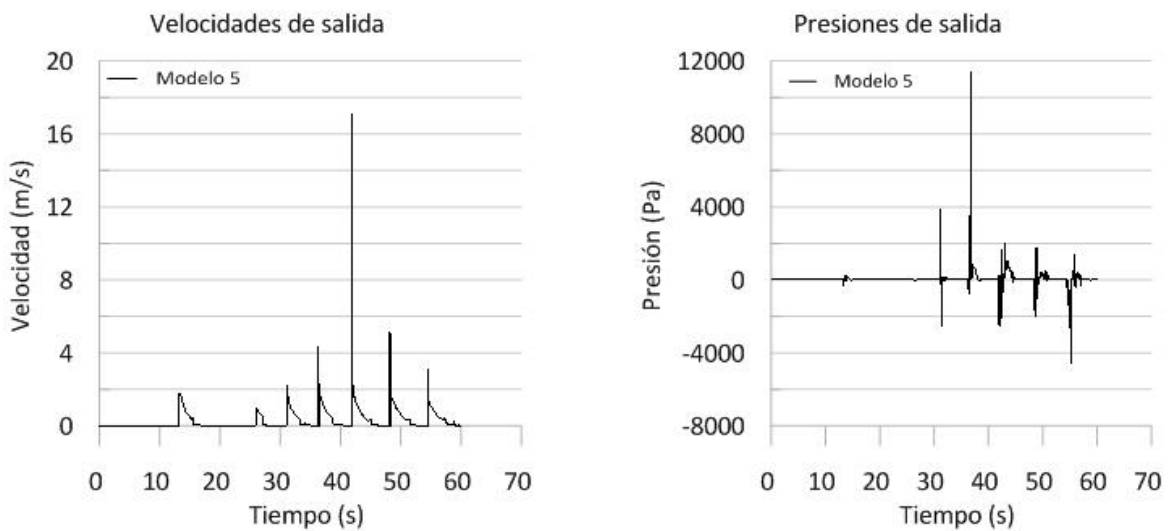


Figura 45 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 5.

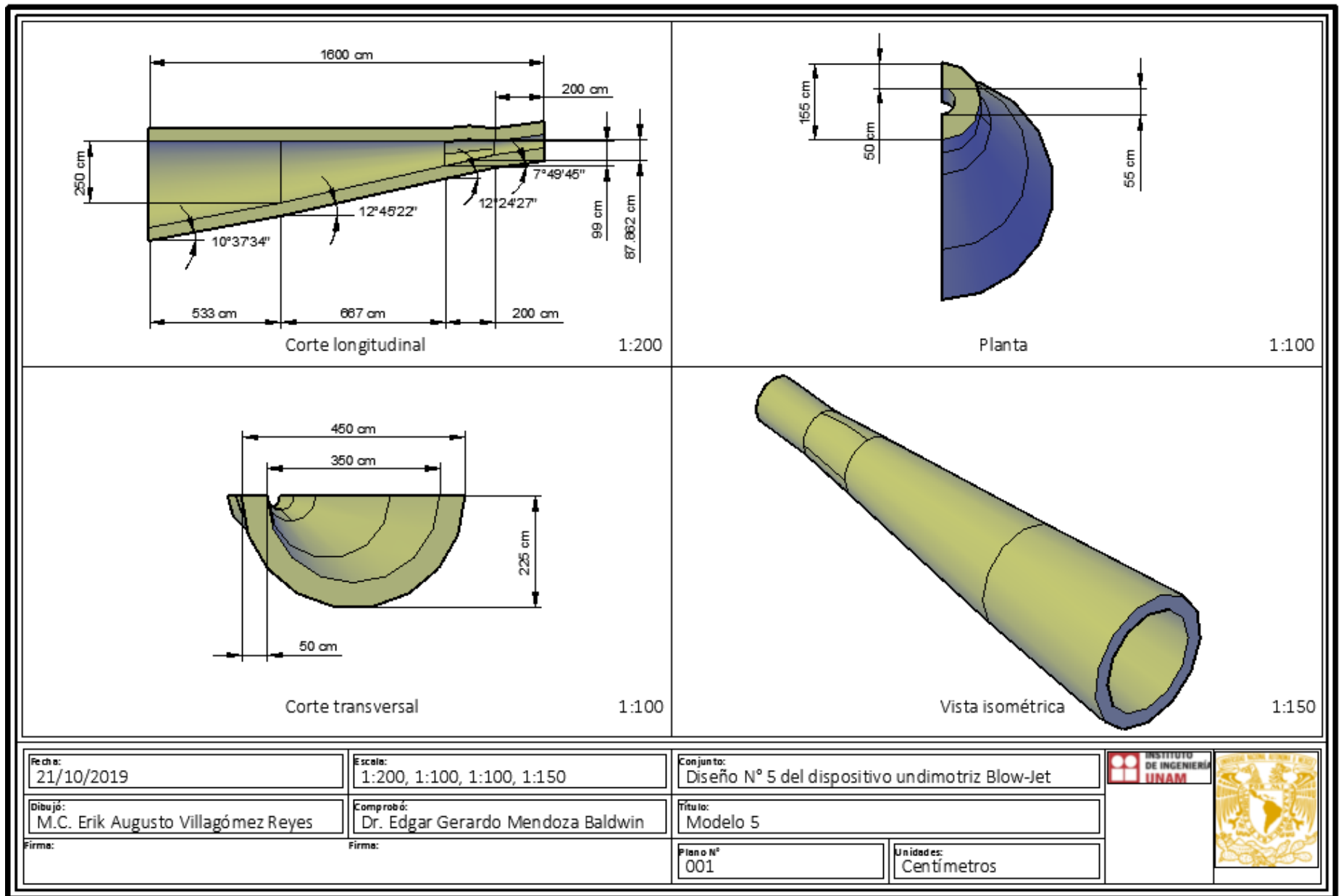


Figura 46 Plano mecánico del modelo 5 sometido a CFD.

5.1.8. SIMULACIÓN DEL MODELO 6

Se conforma una malla de tres bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 60 s. La malla es de 9600 cm de largo por 525 cm de ancho y 1600 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm, con una sumergencia de 176.667 cm y se incrementó la altura de la concavidad hasta 30 cm, además se colocaron sensores de presión y velocidad. La figura 47 muestra un instante en la simulación.

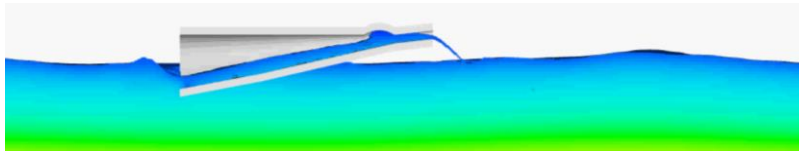


Figura 47 Instante en la simulación la bóveda sigue sin producir el efecto deseado, dren lento al interior.

El chorro a la salida del dispositivo es pobre, se produce la rotura de la onda justo antes de la entrada del dispositivo, el tiempo de desalojo del remanente de agua es muy largo, al igual que el recorrido de la ola dentro del dispositivo. Para la simulación posterior se realizarán las siguientes modificaciones. Se acortará la longitud del dispositivo a 1200 cm, la altura de la cámara de compresión se reducirá 5 cm. La figura 48 muestra las gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo en general se aprecia un mejor desempeño en el modelo 5. La figura 49 muestra el plano mecánico del modelo 6.

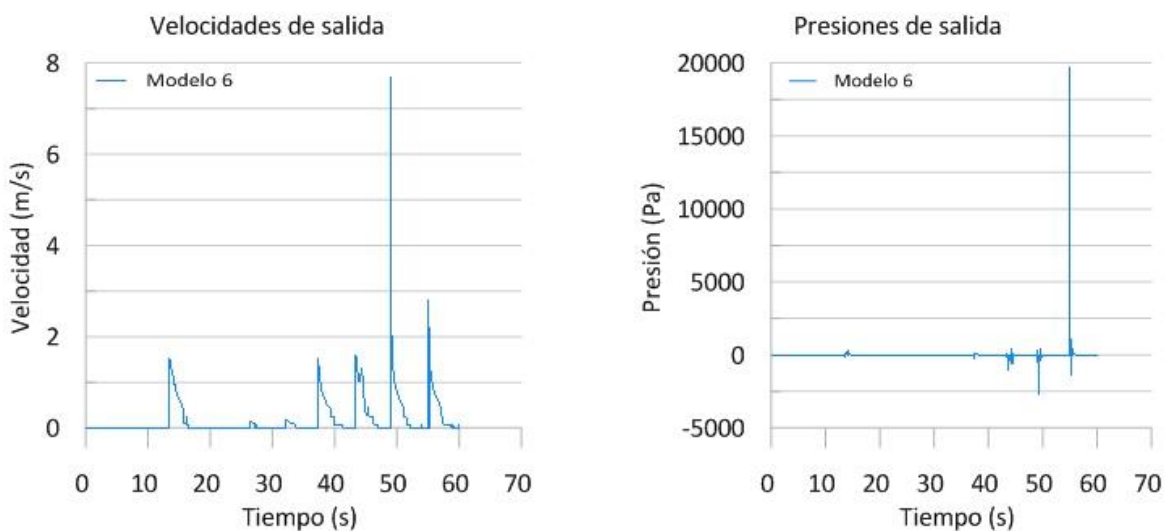


Figura 48 Gráficas de velocidades y presiones de la simulación 6.

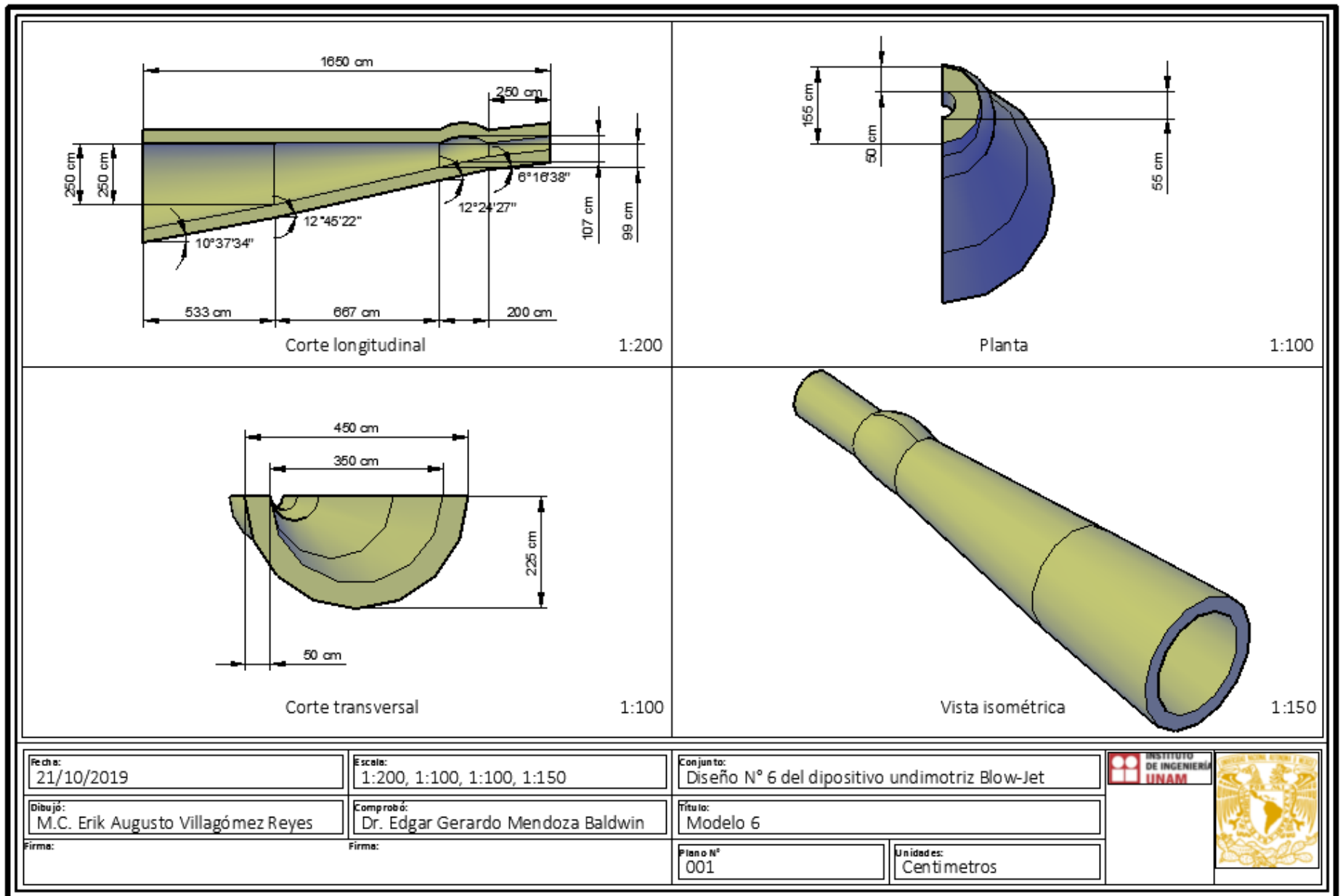


Figura 49 Plano mecánico del modelo 6 sometido a CFD.

5.1.9. SIMULACIÓN DEL MODELO 7

La actual simulación presenta una malla de tres bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 30 s. La malla es de 9600 cm de largo por 525 cm de ancho y 1600 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm, con una sumergencia de 176.667 cm se redujo la altura de la concavidad hasta 25 cm, se colocaron sensores de presión y velocidad, un instante de la simulación se muestra en la figura 50.

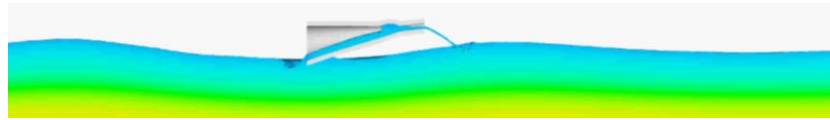


Figura 50 Instante de la simulación del modelo 7.

Tiempo de desalojo del agua remanente muy largo, debido a esto hay rotura justo antes de la entrada del dispositivo gran diámetro a la entrada, bóveda produce efecto contrario al esperado, chorro de baja velocidad y presión, por ello se propone disminuir la altura de la cámara de compresión, así como disminuir el diámetro de salida, se espera que incrementar la pendiente permita un desalojo más rápido. La figura 51 muestra las gráficas de velocidad y presión a la salida del dispositivo el modelo anterior presentó mejor desempeño. La figura 52 presenta el plano mecánico del modelo 7.

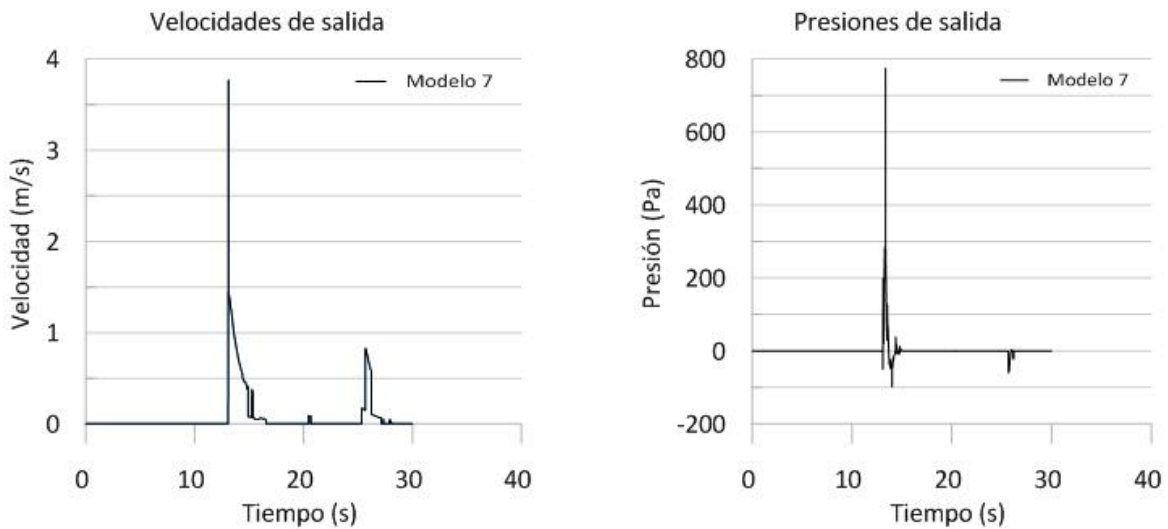


Figura 51 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 7.

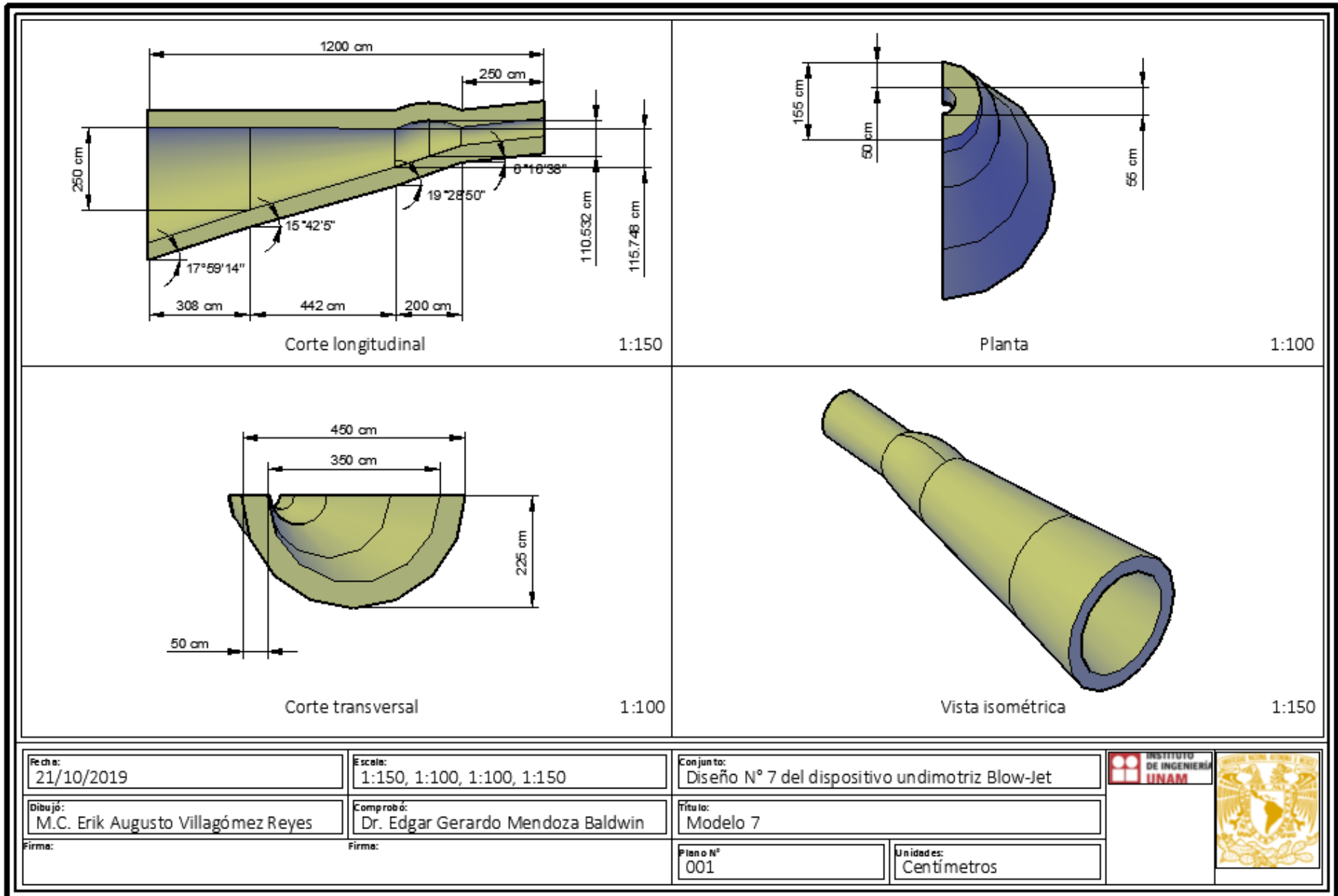


Figura 52 Plano mecánico del modelo 7 sometido a CFD.

5.1.10. SIMULACION DEL MODELO 8

Se conformó una malla con 5 bloques con resoluciones de 8, 14 y 26 cm con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 60 s. La malla es de 9600 cm de largo por 675 cm de ancho por 1400 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un medio del dispositivo. La figura 53 muestra un instante de la simulación del modelo 8.

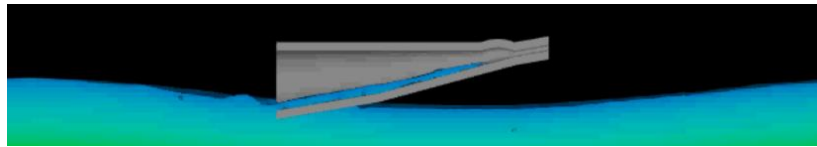


Figura 53 Frame de la simulación del modelo 8.

En la simulación se aprecia reflexión al primer arribo de la primera ola, baja velocidad dentro del dispositivo, el chorro a la salida del dispositivo se presenta pobre y de baja velocidad. Se aprecia rotura a la entrada de la zona de captación por ello se propone un corte inclinado a la entrada del dispositivo bajo la teoría de causar fricción en la cresta de la ola y evitar la rotura al interior del dispositivo. La grafica de velocidad y presión a la salida del modelo se presentan en la figura 54. Se aprecia en las gráficas que durante el transcurso del tiempo la velocidad disminuye y la presión aumenta, esto es la representación del efecto venturi. La figura 55 muestra el plano del modelo 8.

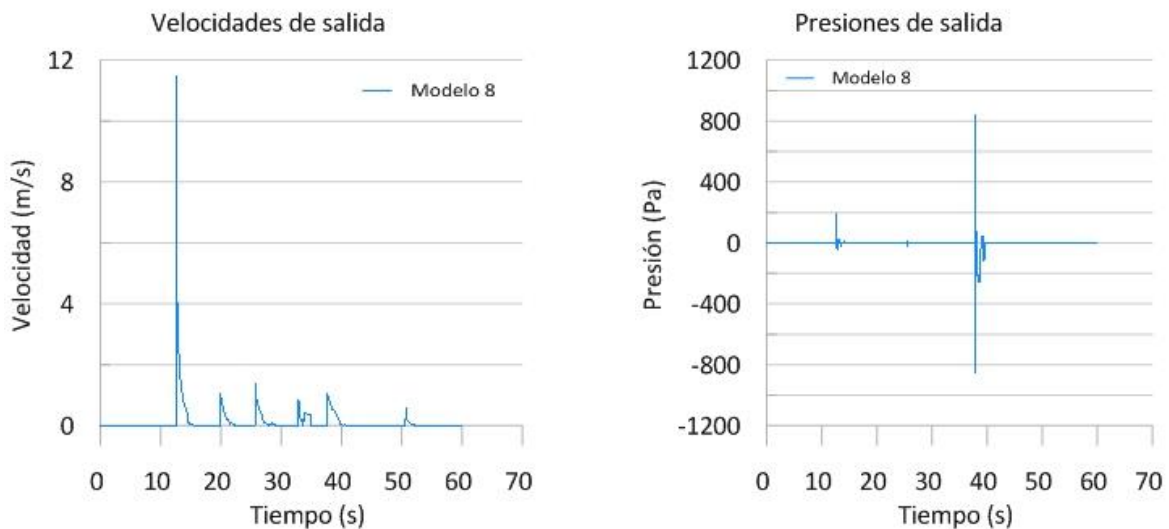


Figura 54 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 8.

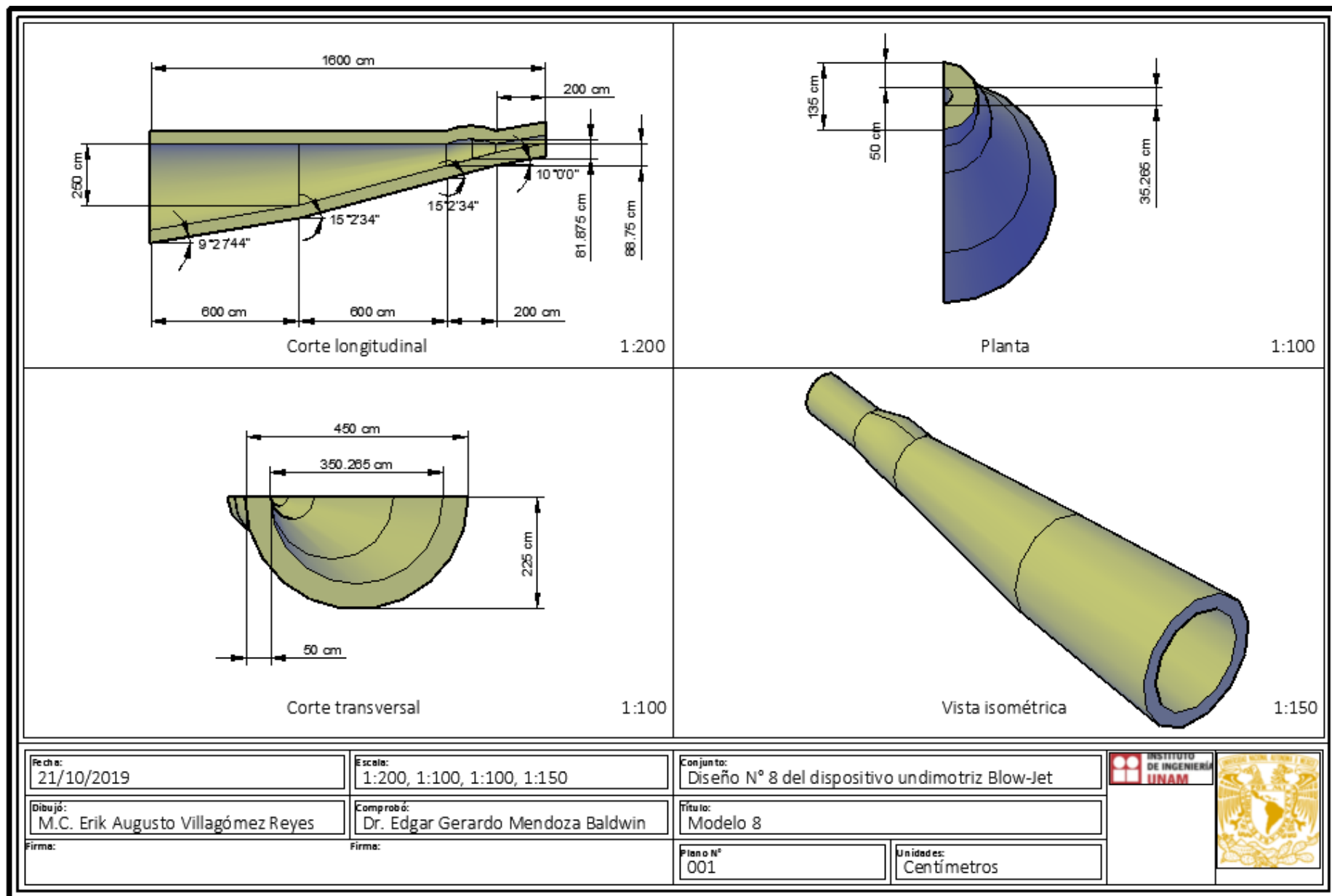


Figura 55 Plano mecánico del modelo 8 sometido a CFD.

5.1.11. SIMULACIÓN DEL MODELO 9

Para la simulación se estructuró una malla de 5 bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 60 s. La malla es de 9600 cm de largo por 555 cm de ancho y 1400 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un medio del dispositivo. Se presenta un gráfico de la simulación en la figura 56.

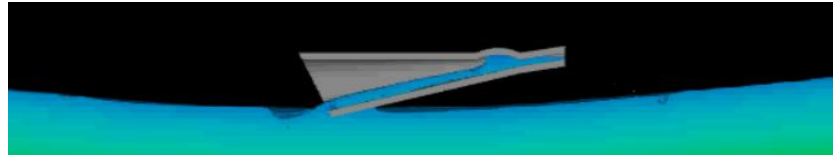


Figura 56 Gráfico de la simulación del modelo 9.

La simulación presenta reflexión al primer arribo de la primera ola, la pendiente de la plantilla hidráulica del dispositivo ocasiona un chorro de baja velocidad a la salida, además la cámara produce una baja de presión. El corte inclinado resulto ser eficaz y la rotura se presenta antes de la zona de captación se propone un corte con una mayor inclinación. Las gráficas de velocidad y presión se muestran en la figura 57. Debido a la concavidad en la cámara se presenta una baja en la velocidad en el transcurso del tiempo, la presión como se observa tiene un comportamiento caótico por ello se eliminará dicha cámara. La figura 58 presenta el plano mecánico del modelo 9.

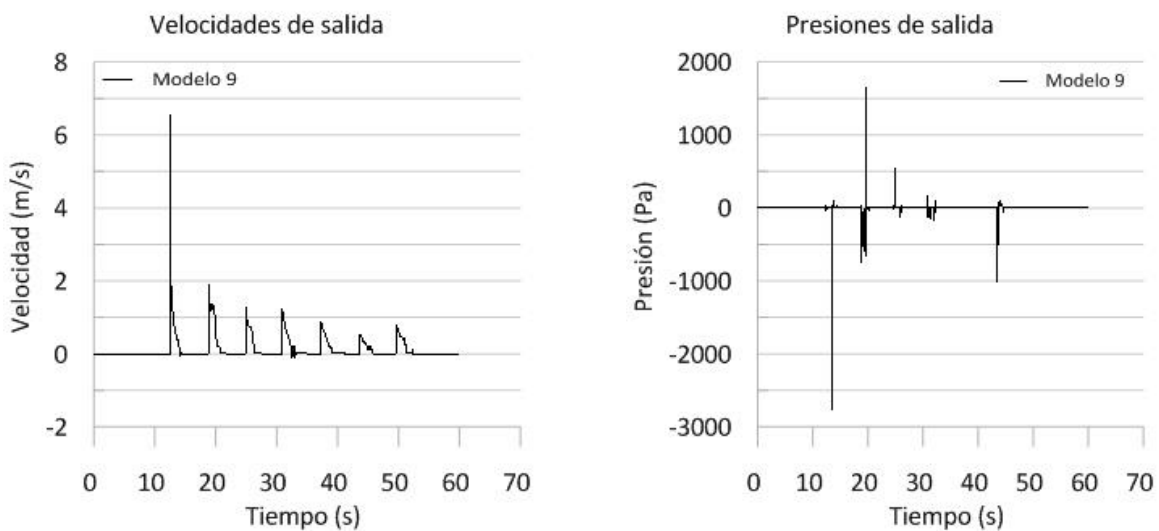


Figura 57 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 9.

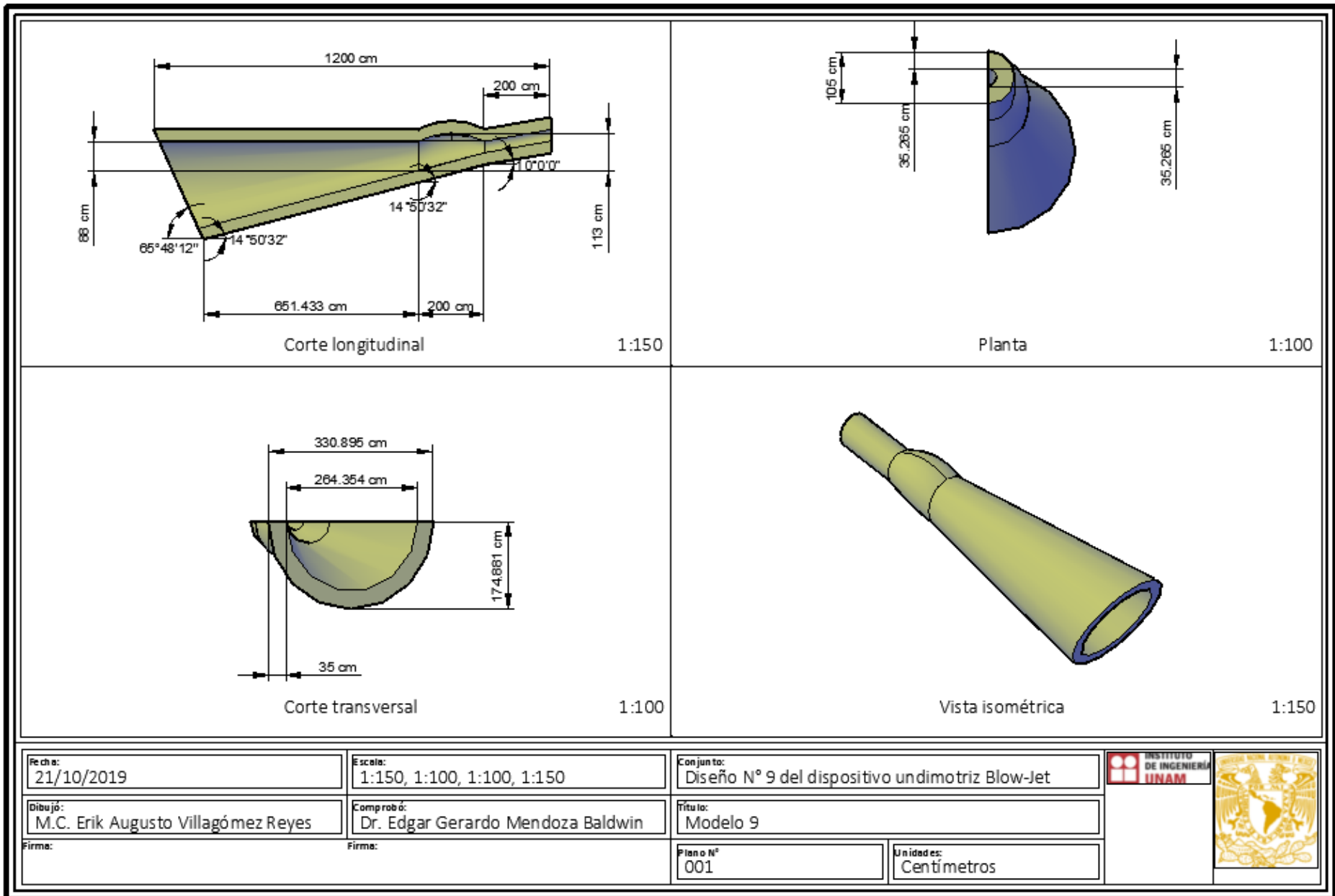


Figura 58 Plano mecánico del modelo 9 sometido a CFD.

5.1.12. SIMULACIÓN DEL MODELO 10

Se conforma una malla con 5 bloques con resoluciones de 7, 12 y 22 cm, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 60 s. La malla es de 9600 cm de largo por 480 cm de ancho y 1400 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un medio del diámetro interior de entrada del dispositivo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. La figura 59 presenta un instante en la simulación del modelo 10.

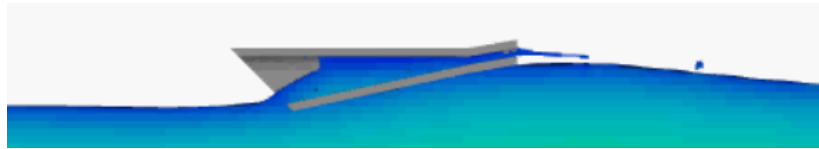


Figura 59 Instante de la simulación del modelo 10.

La reflexión es mínima y las velocidades son grandes en el chorro de salida, en el gráfico de la simulación se aprecia una salpicadura o porción de chorro a una distancia de $2/3$ de la longitud del mismo modelo, es decir, a 800 cm a partir de la salida del dispositivo, debido al corte de 45° de inclinación a la entrada se redujo considerablemente la reflexión como se mencionó anteriormente, se eliminó la concavidad de la cámara de compresión ya que no mostró el comportamiento esperado. Buscando mejorar el desempeño se aumentará el volumen de captación con una entrada tubular en lugar de una reducción esto pronunciará la pendiente de la cámara de compresión acelerando el dren del remanente del flujo. La figura 60 muestra la gráfica de velocidades y presiones, las velocidades son más uniformes y con un incremento significativo durante la simulación, en cuanto a las presiones se observa que a partir de una media presenta picos y estos se repiten eventualmente. Se infiere que el modelo tiene un desempeño medio alto y durante la simulación se presentan picos a la alza.

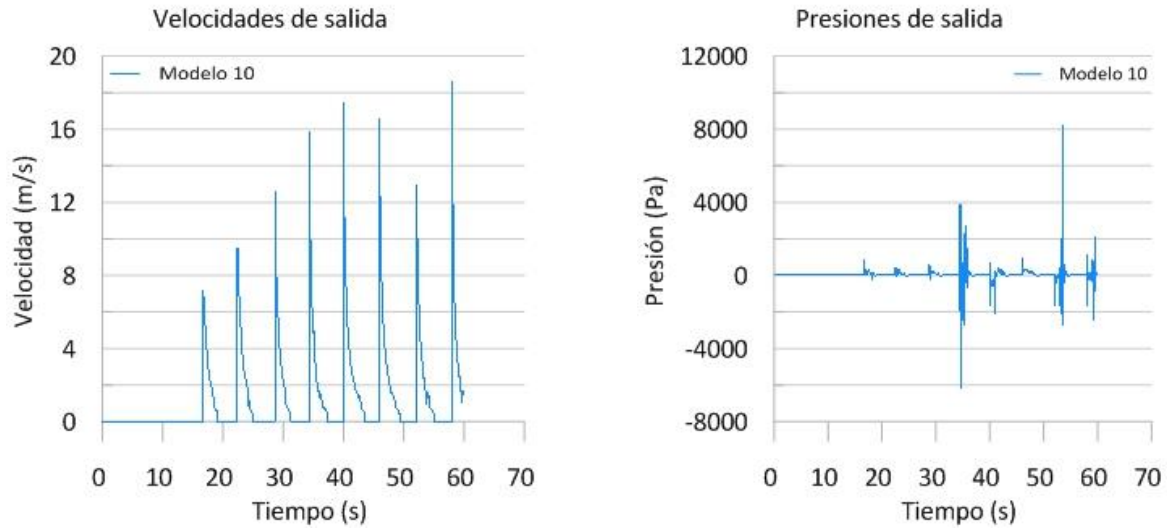


Figura 60 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 10.

El plano mecánico del modelo 10 sometido a CFD se presenta en la figura 61 en corte longitudinal, transversal, vista en planta y vista isométrica.

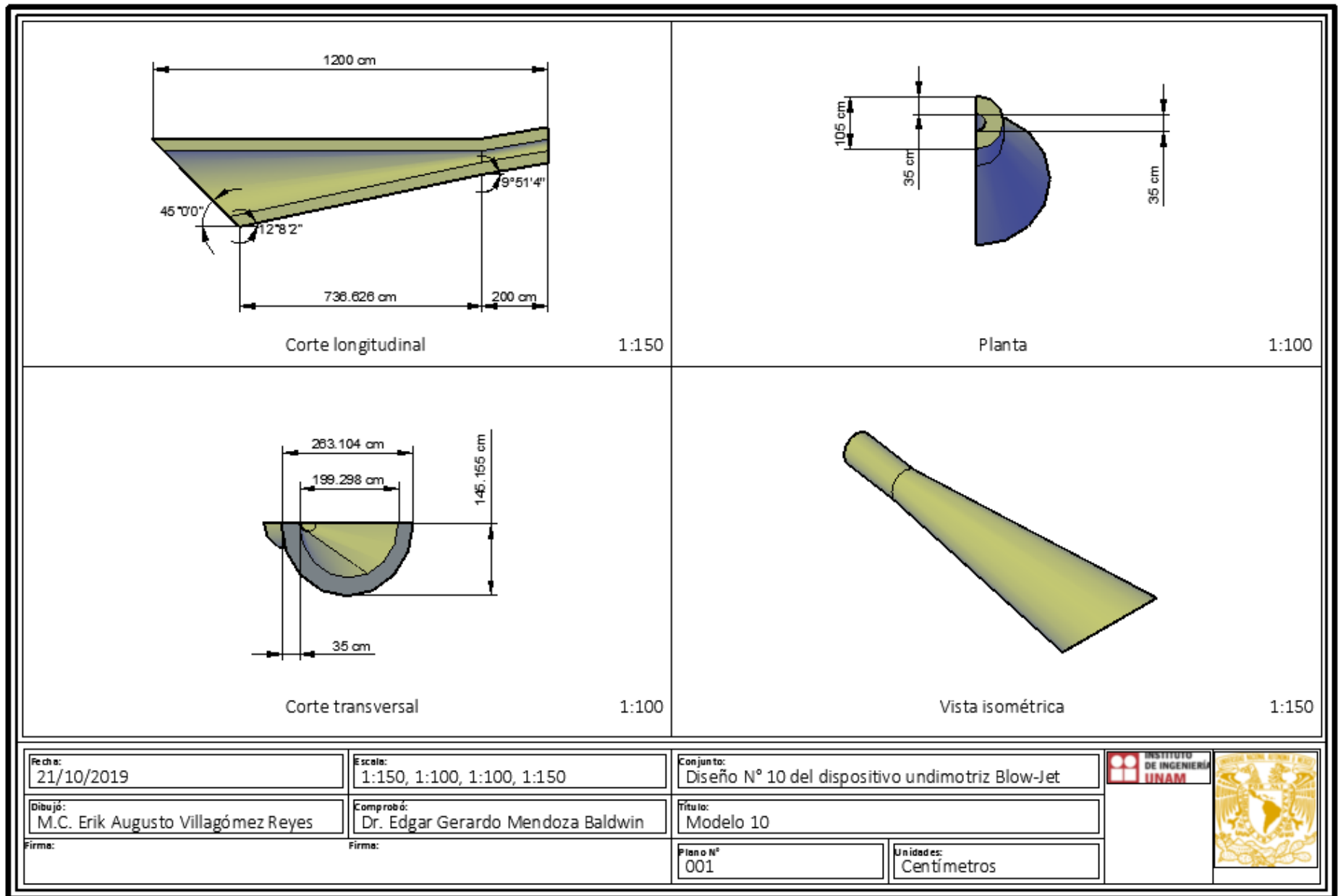


Figura 61 Plano mecánico del modelo 10 sometido a CFD.

5.1.13. SIMULACIÓN DEL MODELO 11

La malla se conforma de 5 bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 100 s. La malla es de 9600 cm de largo por 480 cm de ancho y 1400 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un medio del diámetro interior de entrada del dispositivo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. La figura 62 muestra una ilustración de la simulación del modelo 11.

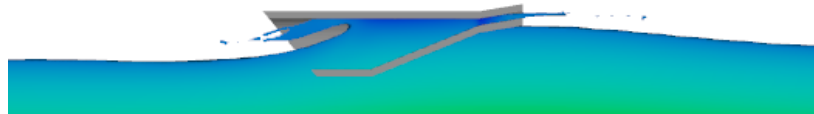


Figura 62 Ilustración de la simulación del modelo 11.

La simulación 11 presenta reflexión de la ola en la zona de captación, velocidades y presiones más bajas comparadas a la simulación 10. Las gráficas de velocidad y presión se muestran en la figura 63 y corroboran lo antes mencionado. El plano mecánico del modelo 11 se presenta en la figura 64.

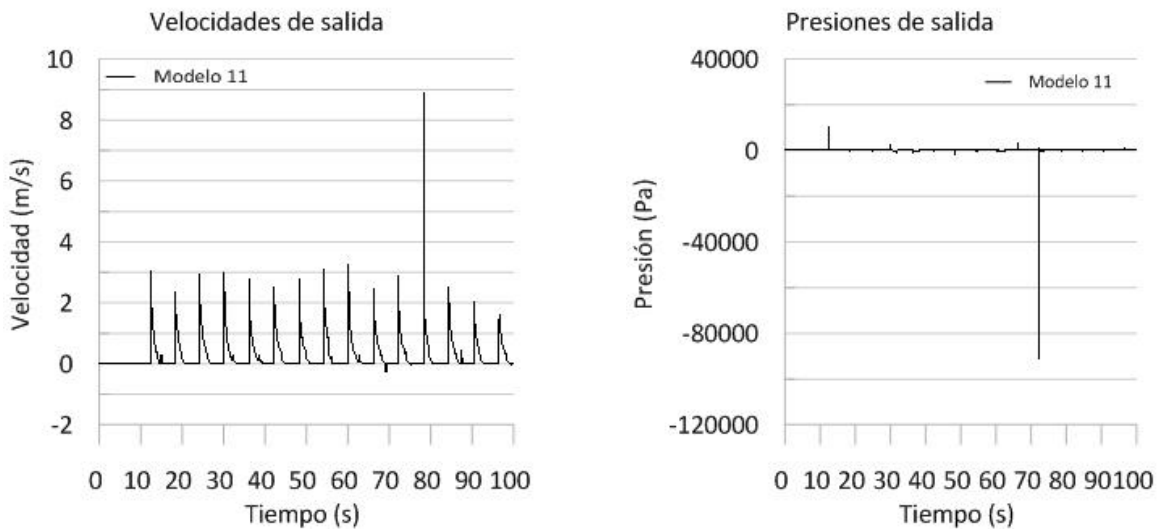


Figura 63 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 11.

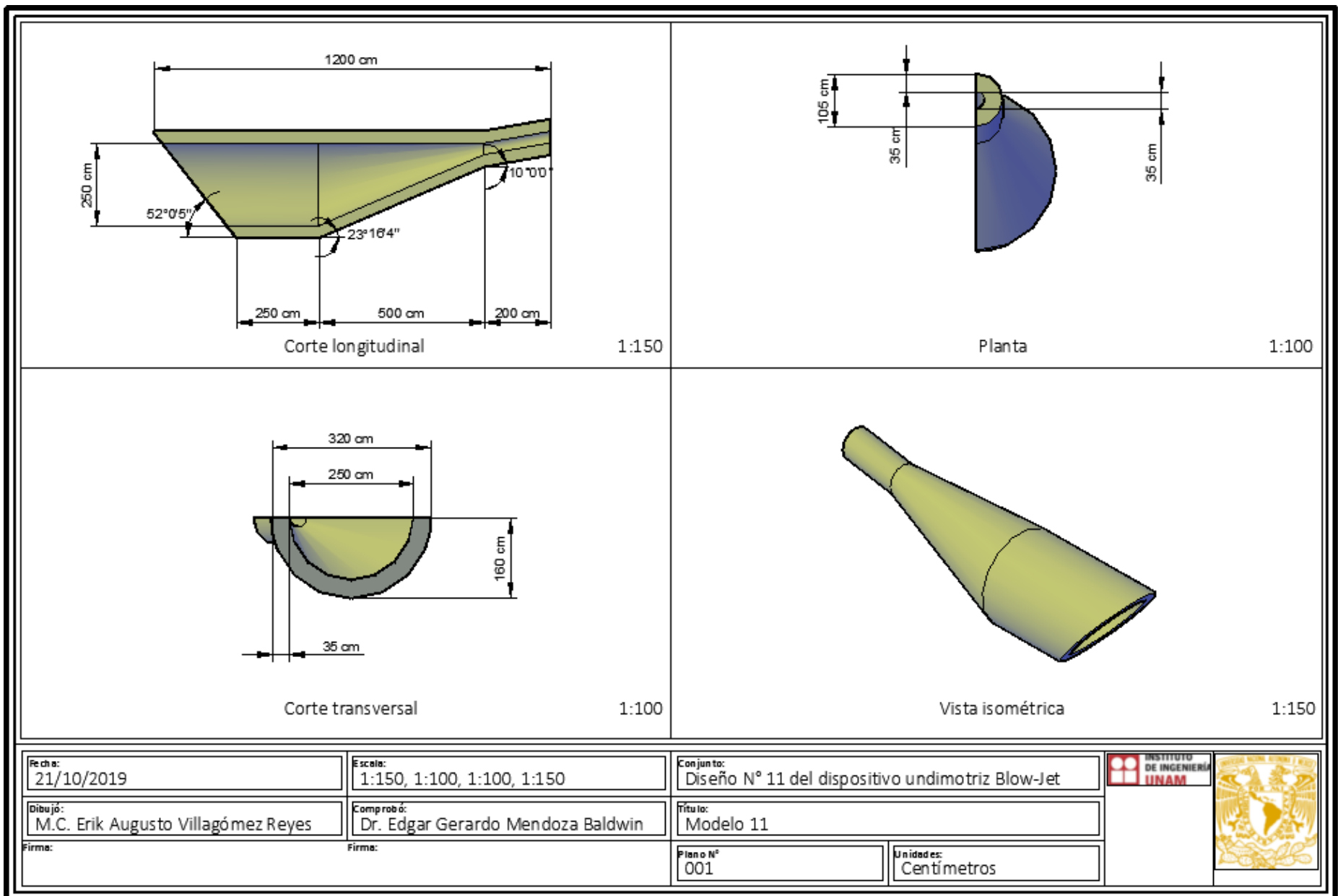


Figura 64 Plano mecánico del modelo 11 sometido a CFD.

5.1.14. SIMULACIÓN DEL MODELO 12

Se utiliza una malla conformada por 5 bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 100 s. La malla es de 9600 cm de largo por 480 cm de ancho y 1400 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm y con una sumergencia de un medio del diámetro interior de entrada del dispositivo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. La figura 65 muestra instante de la simulación.

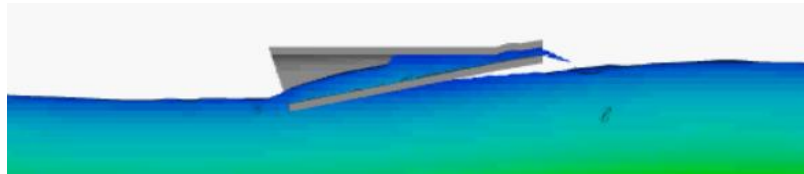


Figura 65 Instante de la simulación del modelo 12.

La cámara de compresión provoca la disminución de la velocidad y presión a la salida, se presenta dren lento las velocidades disminuyen a la salida del dispositivo en el transcurso de la simulación, las presiones no aumentan al disminuir la velocidad por consiguiente no hay efecto venturi figura 66. Por lo antes mencionado se eliminará la concavidad de la cámara de compresión, la zona de captación se modificará para aumentar la pendiente interior en incrementar la velocidad del dren. La figura 67 muestra el plano mecánico del modelo 12.

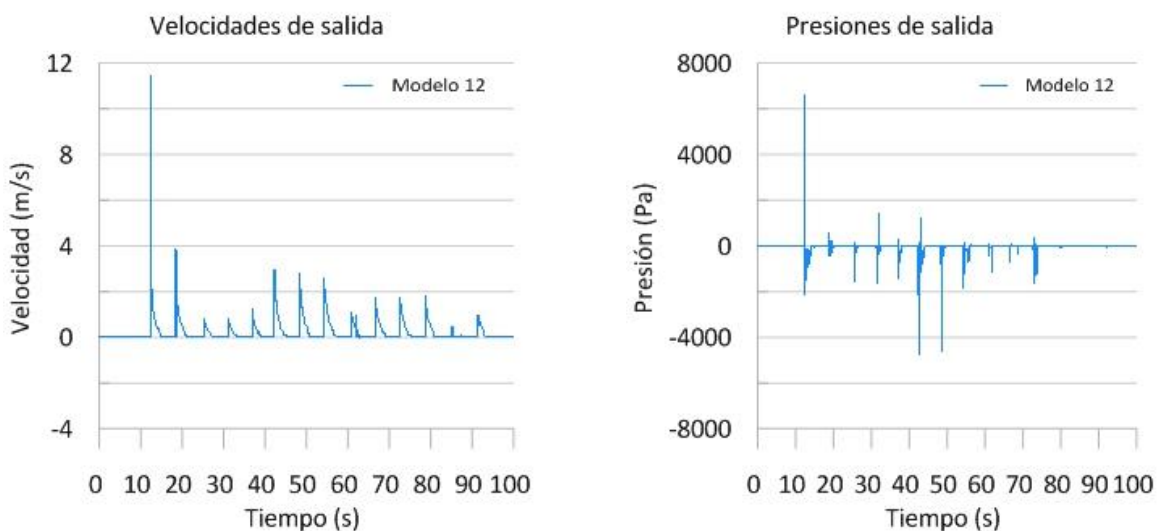


Figura 66 Gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 12.

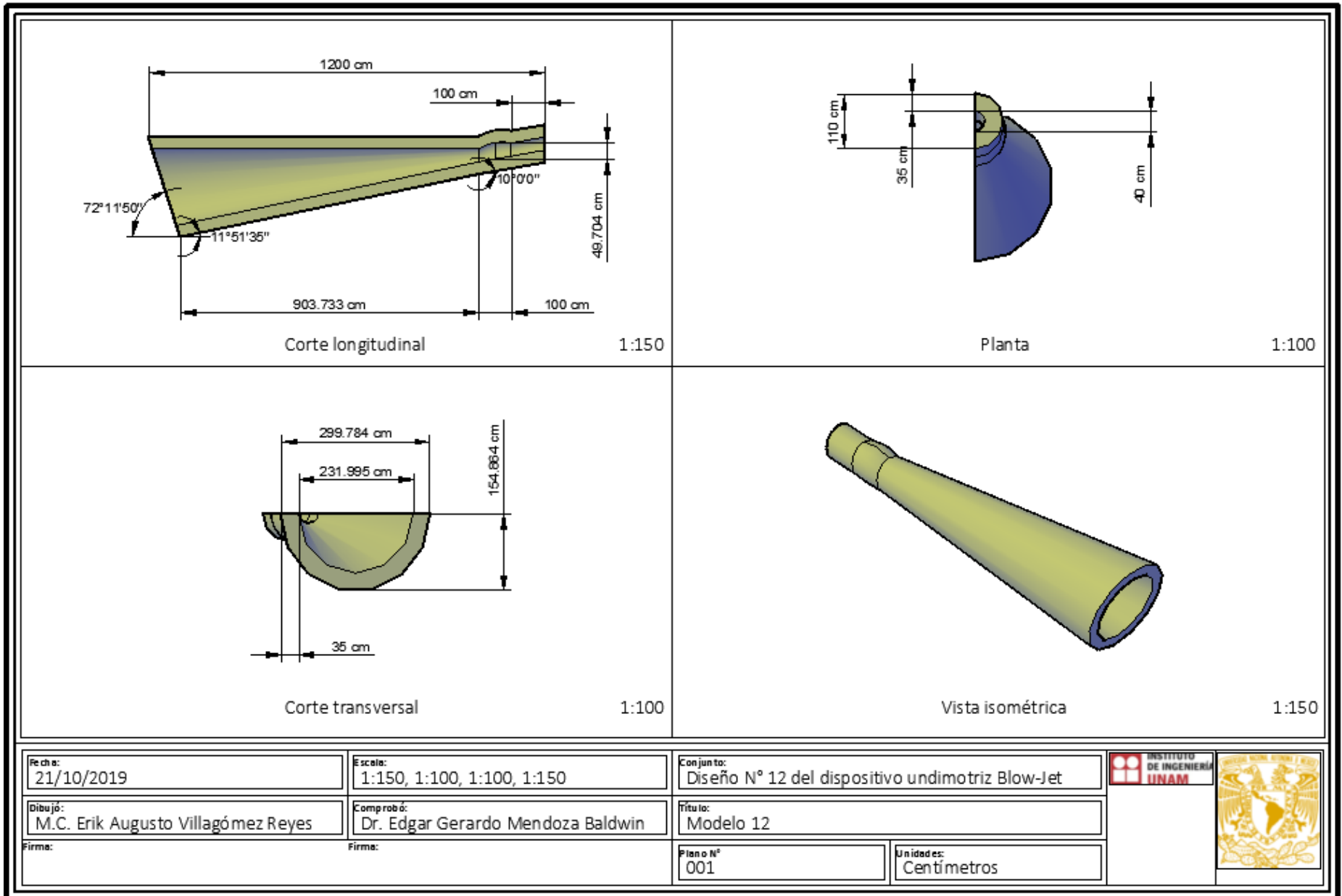


Figura 67 Plano mecánico del modelo 12 sometido a CFD.

5.1.15. SIMULACIÓN DEL MODELO 13

Se conforma la malla con 3 bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-03}$ s con un tiempo de simulación de 60 s. La malla es de 96 m de largo por 4.95 m de ancho y 14 m de alto. A una profundidad de 10 m, con una sumergencia de un medio del diámetro interior de entrada del dispositivo, se adoso una cámara de presión a la salida del dispositivo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. Un gráfico de la simulación del modelo 13 se muestra en la figura 68.

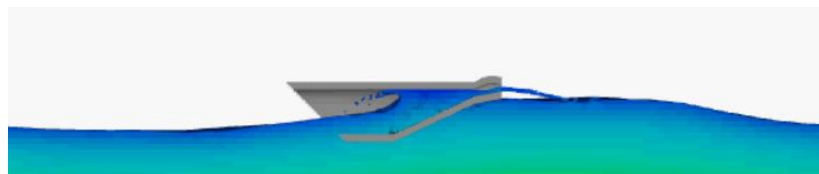


Figura 68 Gráfico de la simulación del modelo 13.

Se presenta reflexión durante el arribo de las primeras olas, debido a que la cámara está situada a la salida del dispositivo la velocidad es baja, las gráficas de la figura 69 muestran que la velocidad durante la simulación disminuye al igual que las presiones, no hay presencia del efecto venturi, el diseño de la zona de captación combinado con el de la cámara de compresión, no es idóneo ya que propicia reflexión. La figura 70 presenta el plano del modelo 13.

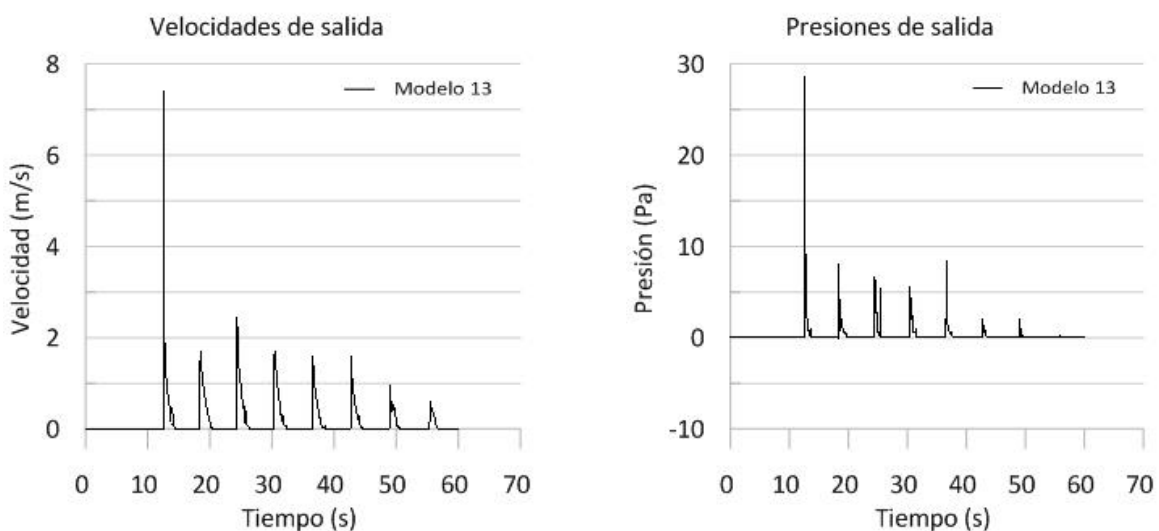


Figura 69 Gráficas de velocidad y presión a la salida de la simulación del modelo 13.

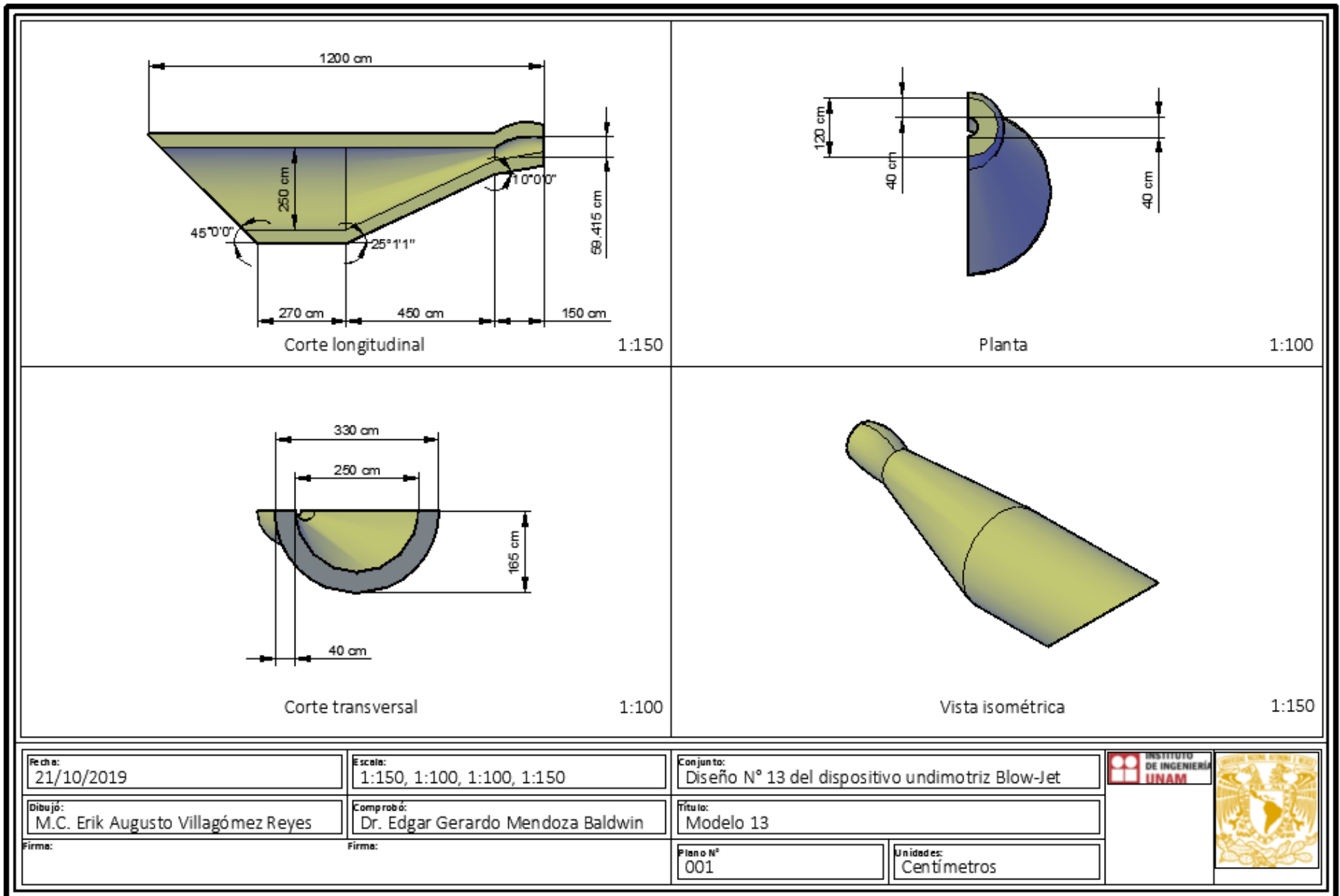


Figura 70 Plano mecánico del modelo 13 sometido a CFD.

5.1.16. SIMULACIÓN DEL MODELO 14

La simulación presenta una malla de 5 bloques, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 100 s. La malla es de 9600 cm de largo por 495 cm de ancho y 1400 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm, con una sumergencia de un medio del diámetro interior de entrada del dispositivo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. La figura 71 presenta un instante de la simulación del modelo 14.

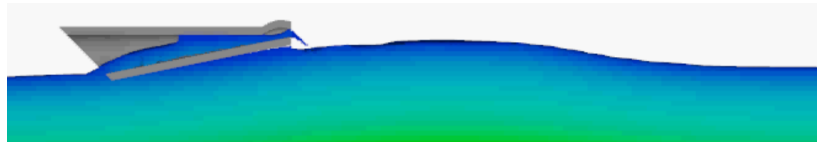


Figura 71 Instante de la simulación del modelo 14.

Reflexión casi nula, debido a la concavidad en la salida del modelo las velocidades son a la baja durante la simulación, las presiones se mantienen uniformes sin cambios importantes y son relativamente bajas figura 72. El adosar concavidad en la cámara de compresión o en la salida del modelo causó efecto contrario al esperado, al menos en secciones cónicas rectas, al considerar esto se emplearán secciones cónicas curvadas para los modelos posteriores, La figura 73 presenta el plano del modelo 14.

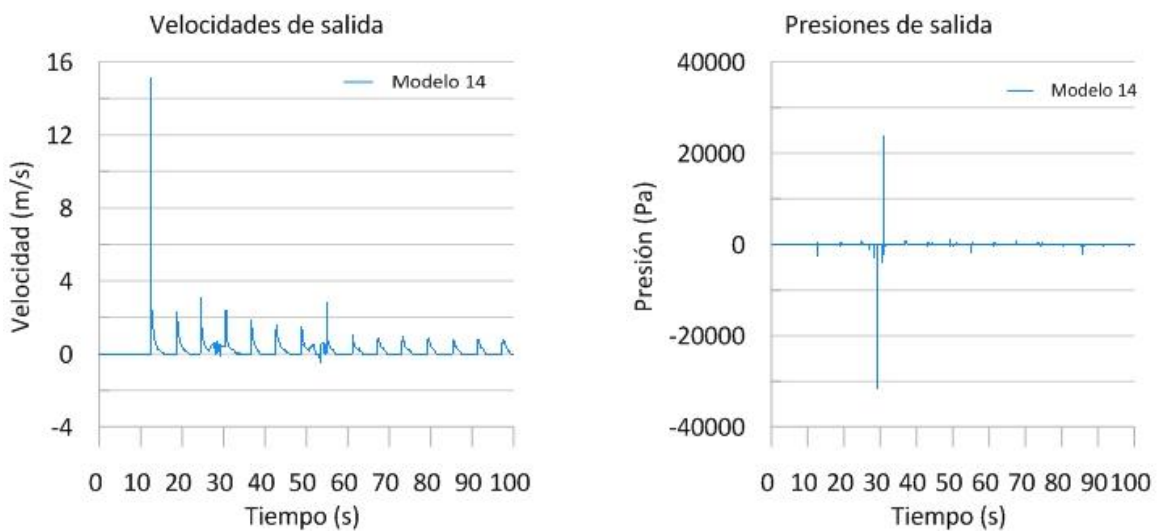


Figura 72 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 14.

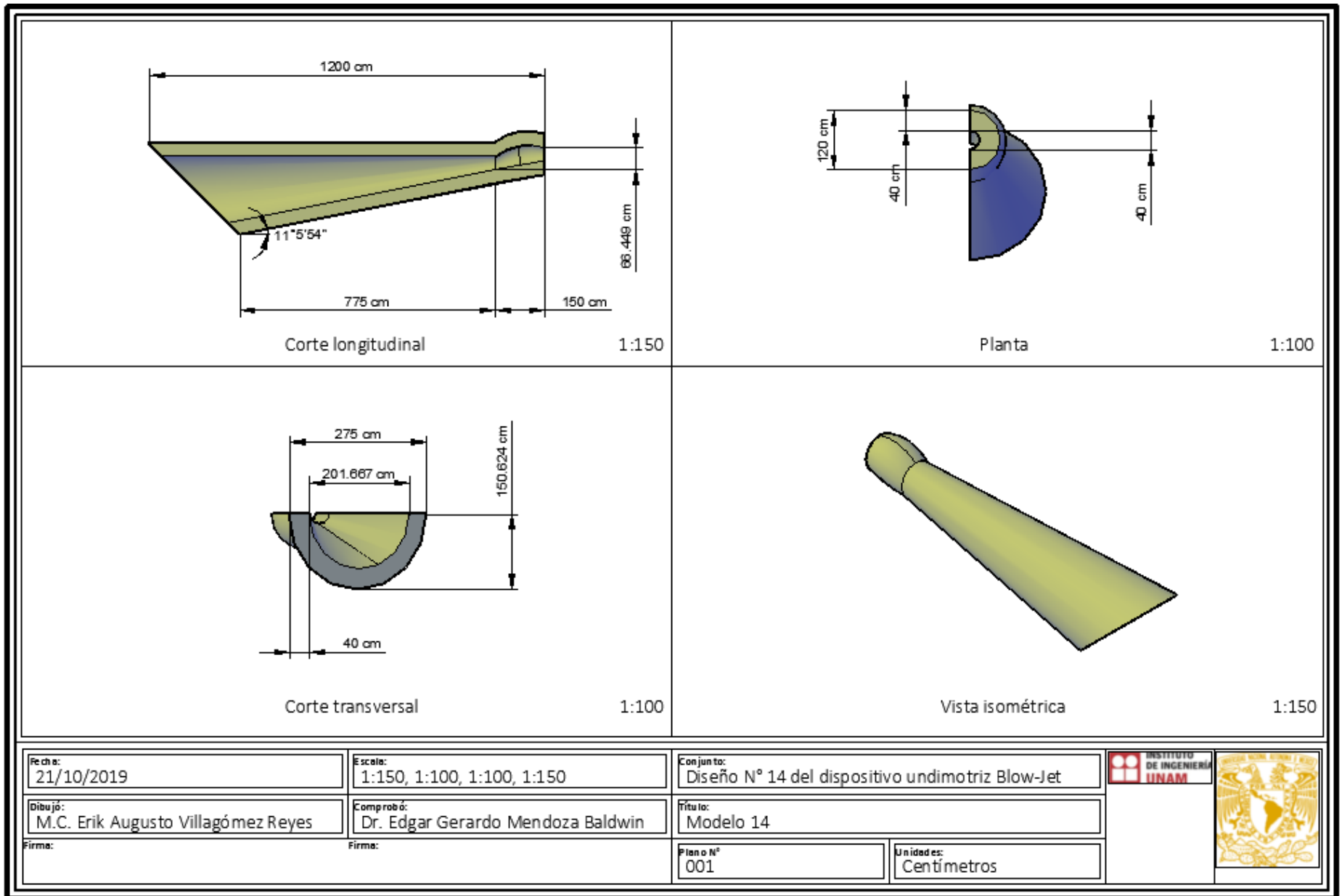


Figura 73 Plano mecánico del modelo 14 sometido a CFD.

5.1.17. SIMULACIÓN DEL MODELO 15

Se utilizaron formas curvas en el diseño del presente modelo, la simulación presenta una malla de 3 bloques con resoluciones de 8 y 14 cm, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 30 s. La malla es de 9600 cm de largo por 495 cm de ancho y 1400 cm de alto. A una profundidad de 1000 cm, con una sumergencia de un medio del diámetro interior de entrada del dispositivo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. La figura 74 presenta una ilustración de la simulación.

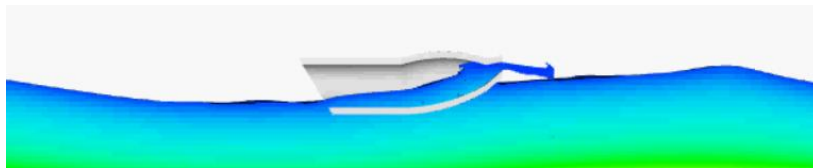


Figura 74 Ilustración de la simulación del modelo 15.

Se presenta reflexión durante toda la simulación, ya que el cambio de diámetro a la salida es muy abrupto, el cambio de presión y velocidad es casi nulo como se aprecia en la figura 75. Al ser tan ancha la cámara de compresión la ola no desaloja completamente el dispositivo esto crea un flujo remanente en el modelo y por la forma curva se crea un efecto de vaivén dentro del dispositivo. Se recomienda disminuir la sección transversal de la cámara de compresión. El plano del modelo 15 se muestra en la figura 76.

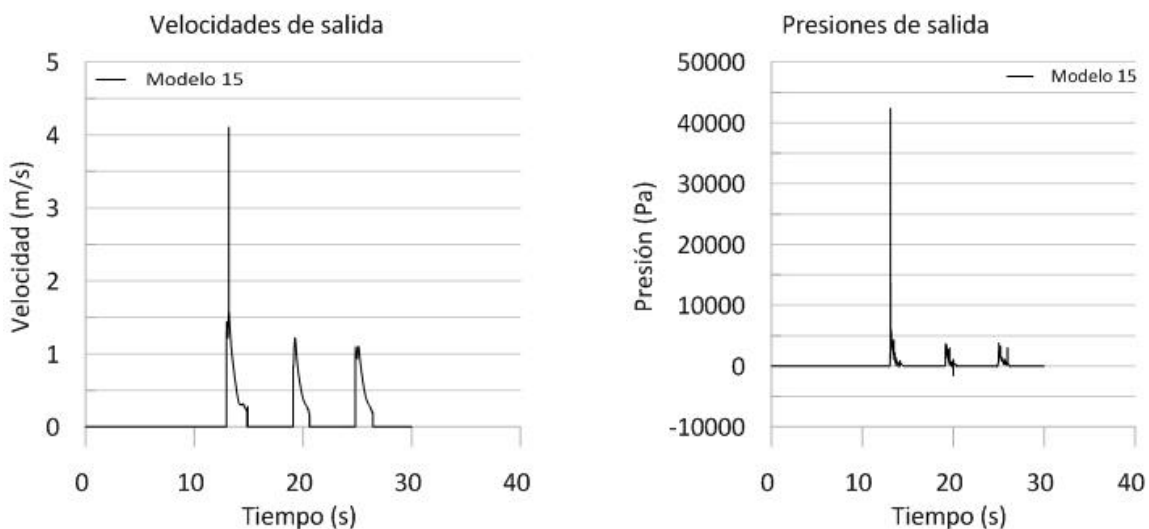


Figura 75 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 15.

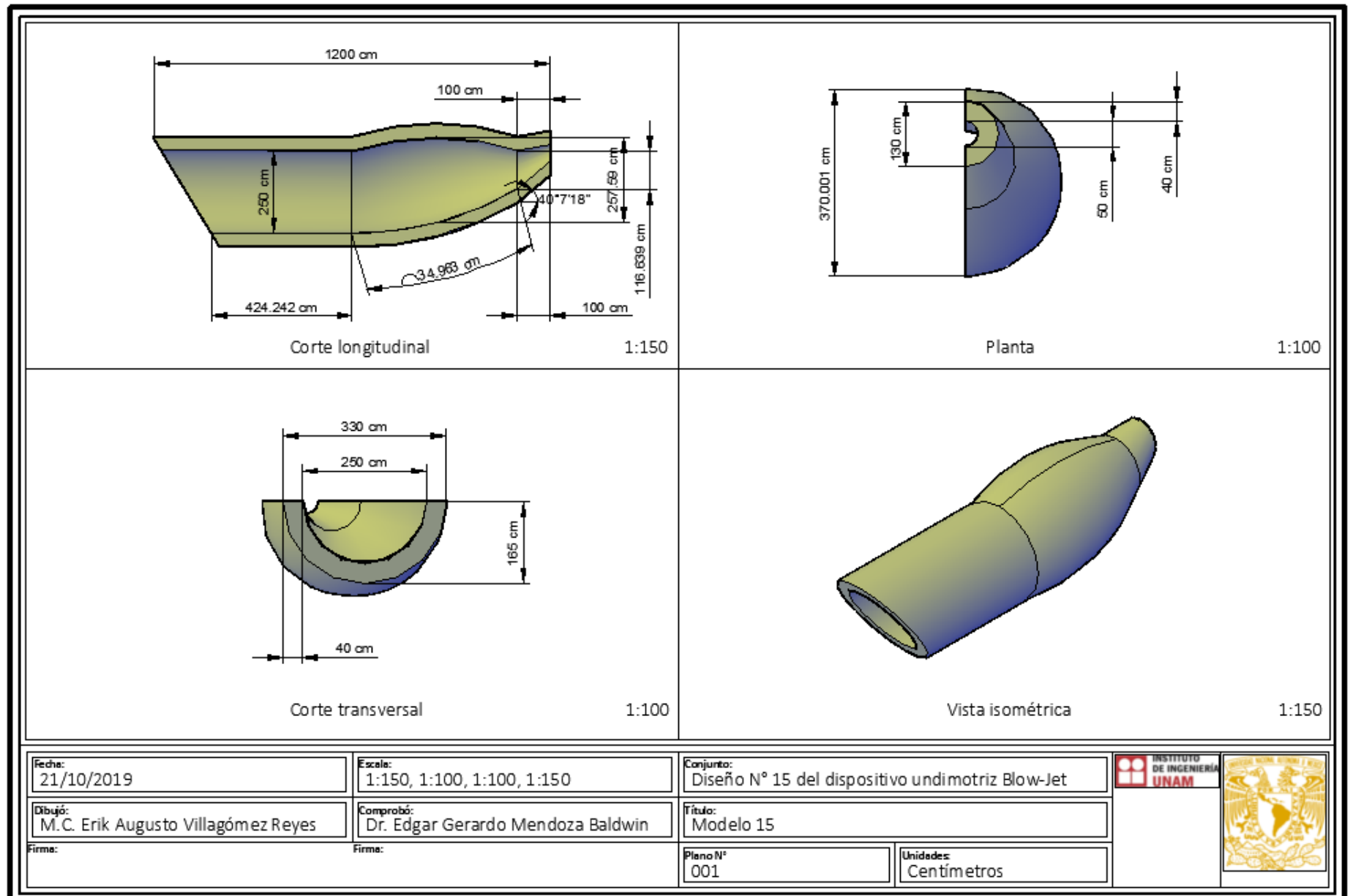


Figura 76 Plano mecánico del modelo 15 sometido a CFD.

5.1.18. SIMULACIÓN DEL MODELO 16

Se continúa con el concepto de diseño del modelo 15, de utilizar formas curvas, la simulación presenta una malla de 4 bloques con resoluciones de 0.085 y 0.145 m, con un paso de tiempo de $1E^{-07}$ s con un tiempo de simulación de 25 s. La malla es de 96 m de largo por 5.25 m de ancho y 14 m de alto. A una profundidad de 10 m, con una sumergencia de un medio del diámetro interior de entrada del dispositivo, se colocaron sensores de presión y velocidad a lo largo del dispositivo. Un instante de la simulación del modelo 16 se muestra en la figura 77.

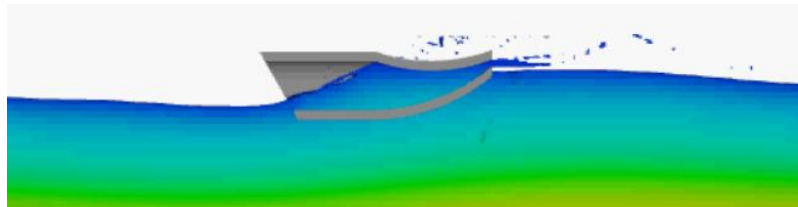


Figura 77 Instante de la simulación del modelo 16.

Reflexión presente durante la simulación, velocidades altas en el chorro de salida, las presiones son bajas no se produce el efecto venturi. La figura 78 presenta las gráficas de velocidad y presión a la salida del modelo 16. La figura 79 muestra el plano mecánico del dispositivo 16.

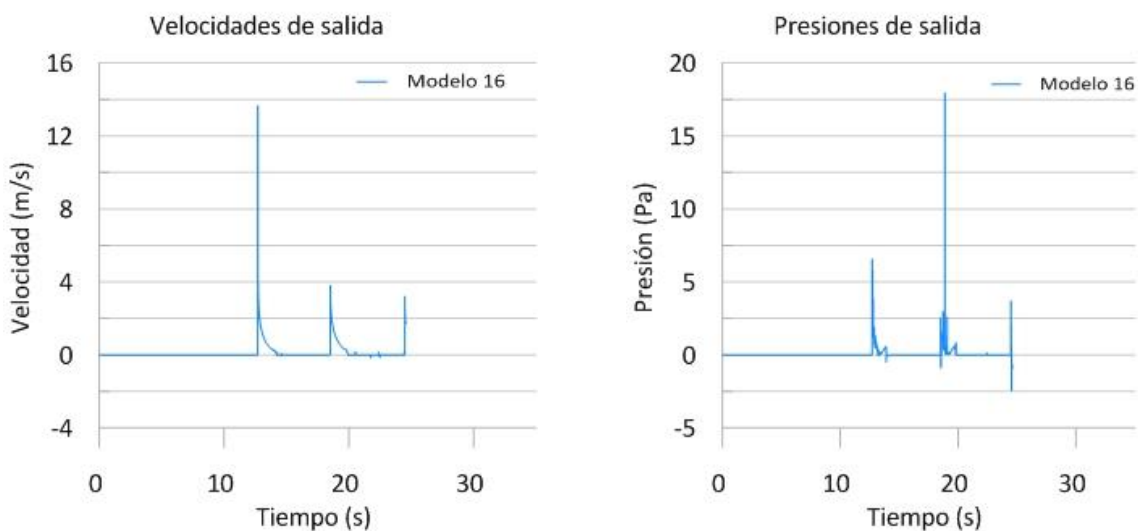


Figura 78 Gráficas de velocidades y presiones a la salida del modelo 16.

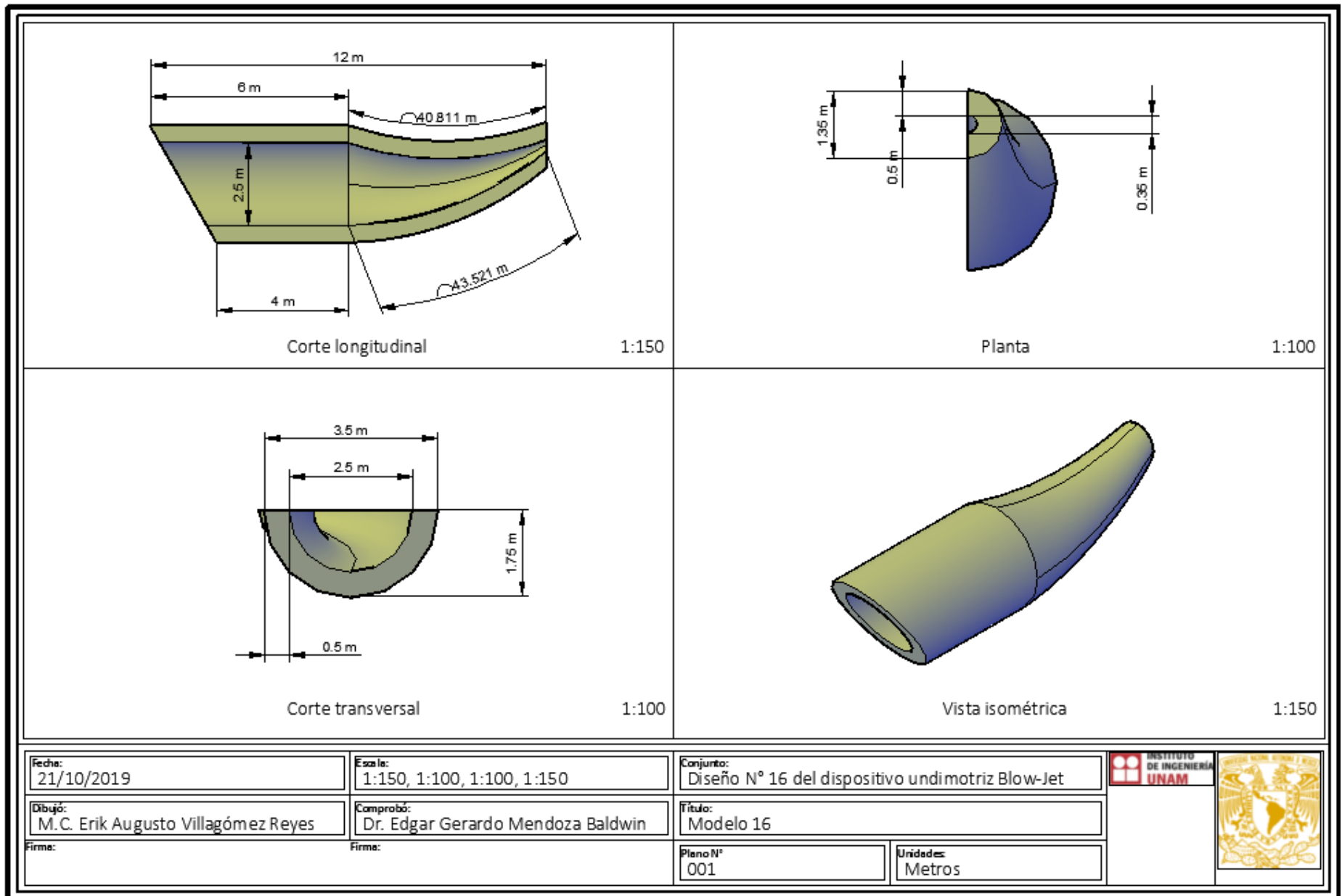


Figura 79 Plano mecánico del modelo 16 sometido a CFD.

5.2. COMPARACIÓN DE LAS SIMULACIONES DE LOS MODELOS

Se concentran las velocidades de salida de los diferentes modelos y presentan de forma gráfica en la figura 80 de igual forma se presentan los datos de presión en la figura 81.

La tabla 11 muestra las velocidades y presiones máximas y promedios de las simulaciones, a la salida de los modelos con el modelo numérico FLOW-3D, se presentan los parámetros del sensor situado justo en la salida del dispositivo, los datos registrados se presentan en crudo o rawdata.

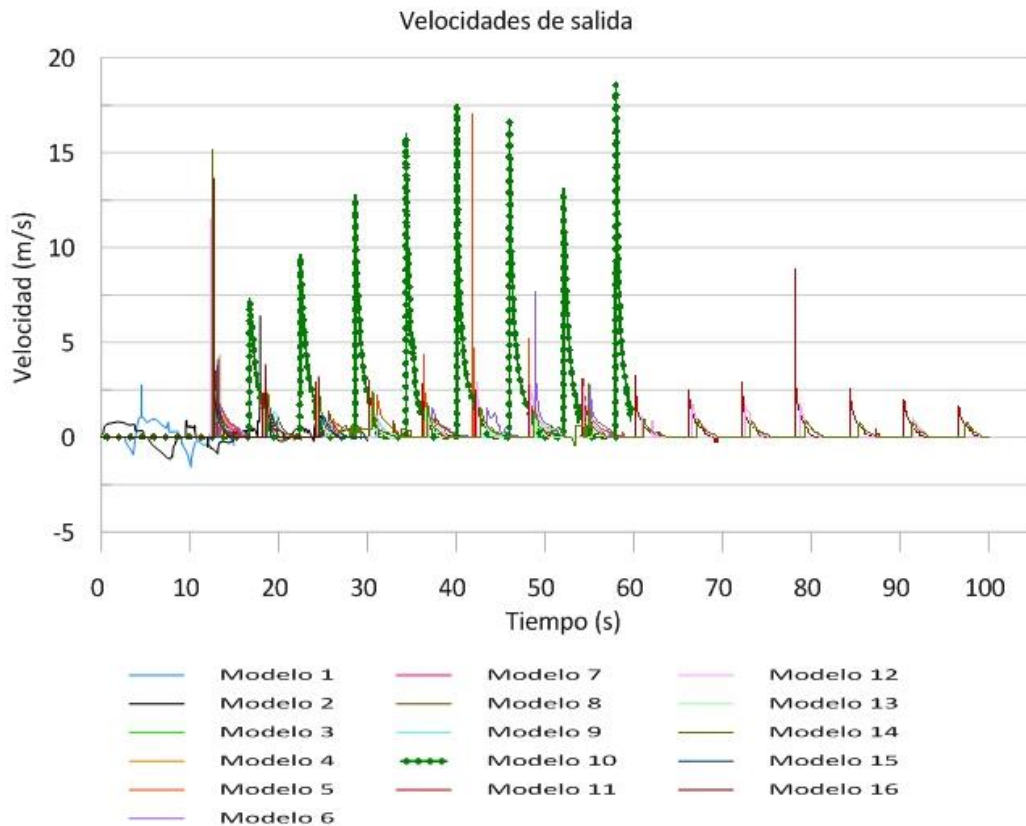


Figura 80 Velocidades de salida de todos los modelos sometidos a CFD.

Como se puede observar las velocidades más altas y que presentan un comportamiento más armónico son las pertenecientes al modelo 10. El modelo 11 de igual forma presenta una tendencia armónica pero las velocidades son menores, el modelo 5 también presenta

velocidades altas aun así las del modelo 10 son superiores, además el perfil de la onda es menos armónico.

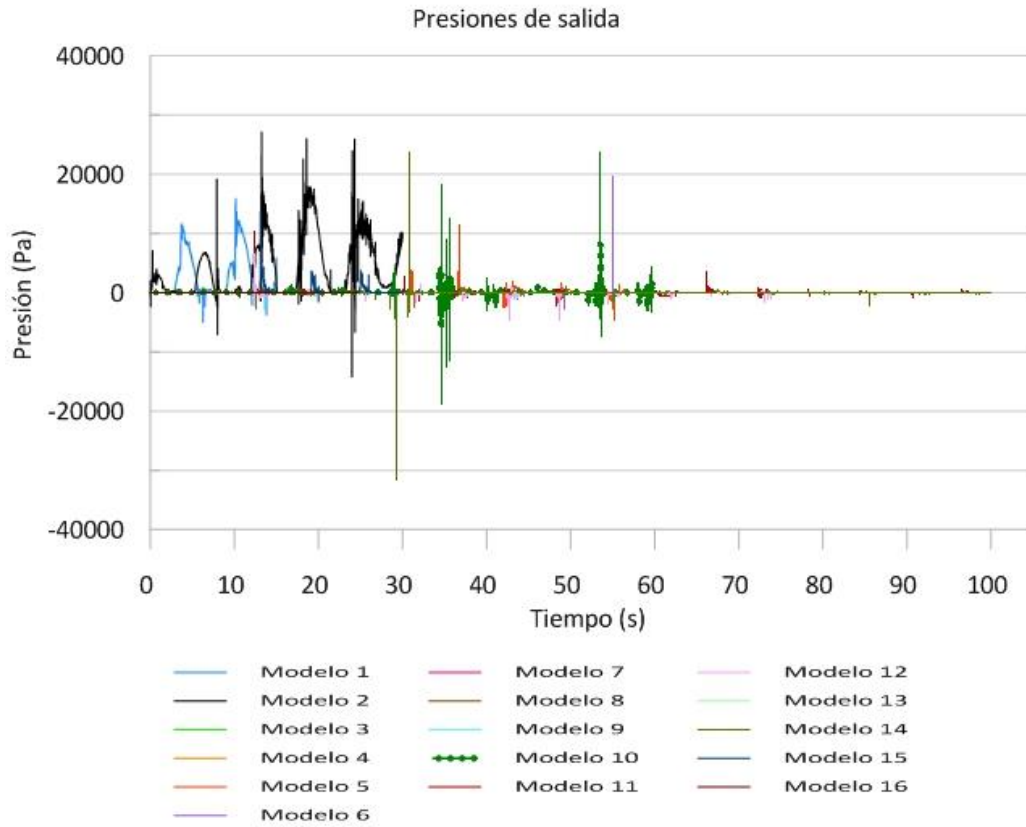


Figura 81 Presiones de salida de todos los modelos sometidos a CFD.

Como se puede apreciar en la figura 81 los modelo 1 y 2 presentan las presiones más altas esto debido que dichos modelos presentan la salida ahogada y los sensores registran tanto a la izquierda como a la derecha del sensor, excluyendo estas excepciones las presiones más altas corresponden al modelo 10.

Tabla 11 Velocidades medias y máximas de las simulaciones realizadas.

WEC y/o Modelo	Velocidad media (m/s)		Velocidad max (m/s)		Presión media (Pa)		Presión max (Pa)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	7.52E-01	2.70E+00	2.837717	2.75705	6823.116	2531.48	44927.97	41896.376
2	3.75E-01	3.80E+00	3.200944	6.40572	7875.727	-1841.26	68495.38	289273.71
3	0.00E+00	1.51E-01	0	0.95485	1147.995	-0.00029	17605.5	0
4	2.63E-01	3.62E-01	2.122612	4.2494	2413.938	2.39125	19193.75	808.8598
5	2.10E-01	2.85E+00	2.065858	16.8838	7632.345	4.46194	61377.66	11371.312
6	1.27E-01	9.20E-01	5.210048	7.46174	9895.96	-4.63836	92222.03	19672.315
7	4.82E-01	1.42E-01	3.961452	3.64234	4312.759	1.72146	39479.49	774.78317
8	3.73E-01	7.03E-01	2.724208	11.0029	1730.232	3.18474	159463.1	840.34728
9	-7.64E-02	5.24E-01	1.691279	6.38675	2520.13	-4.08234	31552.37	1644.1256
10	9.06E-02	1.22E+00	3.325833	1.86E+01	2.79E+03	8.650569	6.65E+04	8.16E+03
11	-1.00E-01	1.80E+00	2.871769	7.52498	3277.487	10.0511	27727.66	10250.003
12	2.53E-02	1.70E+00	5.198697	10.8132	3466.804	-34.4828	170569.8	6585.3176
13	6.14E-02	2.46E+00	3.371207	7.39851	2.049668	0.18903	28.35242	28.541322
14	5.71E-02	4.62E-01	3.14419	15.6823	2897.374	-13.9746	53613.03	23727.219
15	2.40E-02	2.02E+00	1.237244	4.10396	4507.688	177.757	25176.58	42383.565
16	1.26E-01	1.77E+00	1.271297	13.6461	3.493875	0.06791	48.17418	17.950912

Ya que los datos mostrados en la tabla 11, son datos crudos o rawdata por consiguiente algunos valores máximos son muy elevados, esto se debe a que hay algunas simulaciones que presentan fallos, dependiendo la trascendencia del fallo se pueden hacer cambios en tiempo real para evitar la ocurrencia de estos, esto queda a criterio del usuario, algunos de estos fallos quedan en el registro, y aunado a lo anterior explicado de que los sensores bajo ciertas condiciones toman doble registro. Sin tomar en cuenta los valores extremadamente altos y por el comportamiento general el modelo 10 es la mejor opción a elegir para someter a pruebas experimentales en el canal de oleaje.

5.3. COMPARACIÓN DE LAS SIMULACIONES 1 Y 2 DEL BLOW-JET CONTRA LOS ENSAYOS REALIZADOS POR CHÁVEZ DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET.

Chávez (2010) determinó la velocidad del chorro a la salida del dispositivo Blow-Jet con FlowMap, el cual es un sistema de procesamiento de imágenes, la adquisición de datos consiste en registrar la distancia que alcanza el chorro a la salida de dispositivo undimotriz. Chávez (2010) procesó todo el volumen de datos con Fortran, cabe mencionar que en el procesamiento de los datos solo considera como válido cuando en la salida del dispositivo el chorro alcanza una velocidad mínima de 10 cm/s. Para cotejar se utilizan los mismos parámetros que utilizó Chávez (2010) en las pruebas 143 y 255, dichas pruebas son las que arrojaron algunas de las mayores velocidades a la salida del dispositivo como se mencionó al inicio del presente capítulo. La figura 82 muestra las velocidades de salida de las simulaciones 1 y 2 del Blow-Jet.

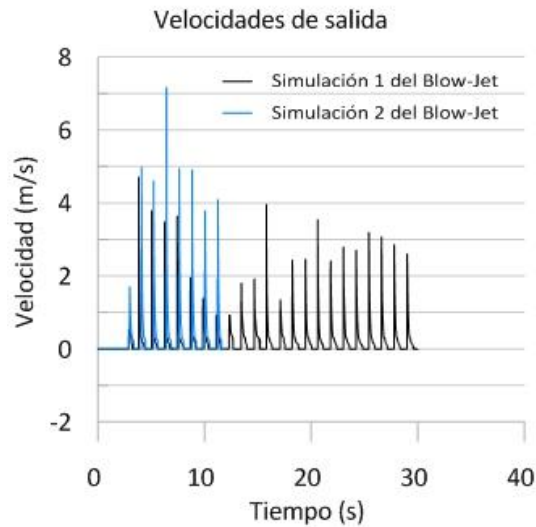


Figura 82 Velocidades de salida de las simulaciones 1 y 2 del Blow-Jet.

En la tabla 12 se muestra las velocidades de salida de las simulaciones 1 y 2 del Blow-Jet y de los ensayos realizados por Chávez, se puede apreciar que la velocidad de salida más alta es de 26.88 m/s y corresponde a la prueba 255 realizada por Chávez (2010). No hay similitud en cuanto a velocidades de salida entre los ensayos realizados por Chávez y las simulaciones 1 y 2. Esta discrepancia entre parámetros de salida se debe principalmente a la diferencia del registro de datos, rugosidad del material. Chávez sólo contabiliza los chorros con velocidades mayores de 10 cm/s y no toda la serie de chorros, sus registros publicados sólo son extractos de todos los datos registrados, además no especifica el

volumen de registros y que tratamiento le da al registro para calcular y presentar la información. Por ello para realizar la comparativa del Blow-Jet contra la nueva geometría corresponderá con los datos obtenidos de las simulaciones 1 y 2 del dispositivo undimotriz Blow-Jet, realizadas en la presente tesis.

Tabla 12 Velocidades medias y máximas de las simulaciones 1 y 2 y de las pruebas realizadas por Chávez del Blow-Jet.

Dispositivo Parámetros	Blow-Jet (prueba 143 de laboratorio- Chávez)	Blow-Jet (simulación 1 sensor 4)	Blow-Jet (simulación 1 sensor 5)	Blow-Jet (prueba 255 de laboratorio- Chávez)	Blow-Jet (simulación 2 sensor 3)	Blow-Jet (simulación 2 sensor 4)
$\bar{V}_s (m/s)$	1.897	0.218	0.104	3.031	2.12	1.99
$V_{smax} (m/s)$	13	4.71	3.64	26.88	7.16	2.76

5.4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN DEL MODELO 10 CON LOS DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBAS DE LABORATORIO.

Se imprimió el dispositivo modelo 10 figura 18 a una escala 1:20 y se realizaron los ensayos indicados en la tabla 6. Las figuras 83 – 88 se presentan los planos mecánicos del modelo 10 que se utilizó para las pruebas de laboratorio.

A continuación se presenta la relación de validación de los ensayos de laboratorio con el modelo numérico: Presiones a la salida del dispositivo medias y máximas, velocidades puntuales a la salida del dispositivo (sólo laboratorio), velocidades a la salida del dispositivo medias y máximas (sólo modelación), gastos puntuales a la salida del dispositivo (sólo laboratorio), gastos a la salida del dispositivo medios y máximos (sólo modelación) y velocidades de entrada del dispositivo medias y máximas.

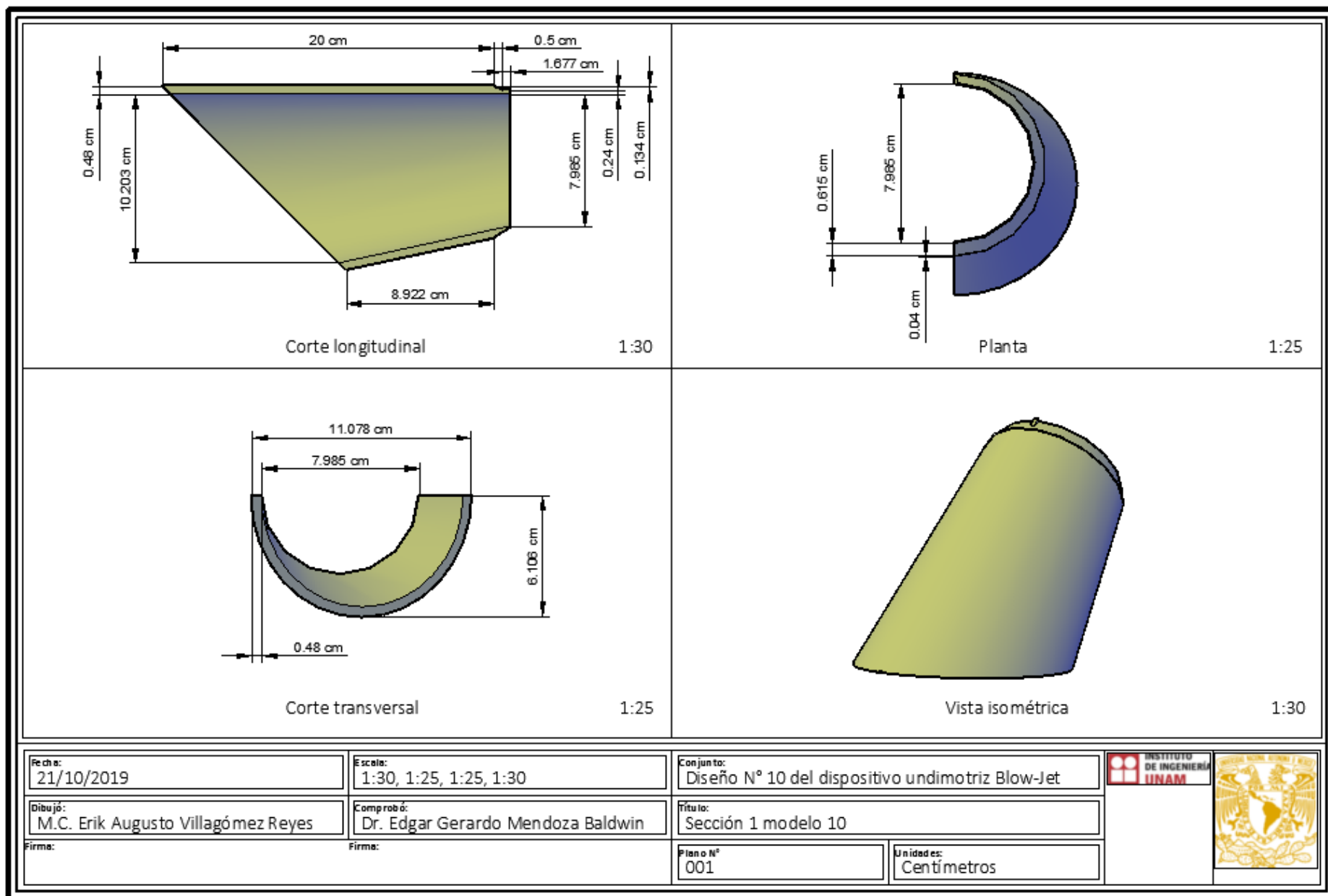


Figura 83 Plano mecánico de la 1er sección del modelo 10 para ensayos.

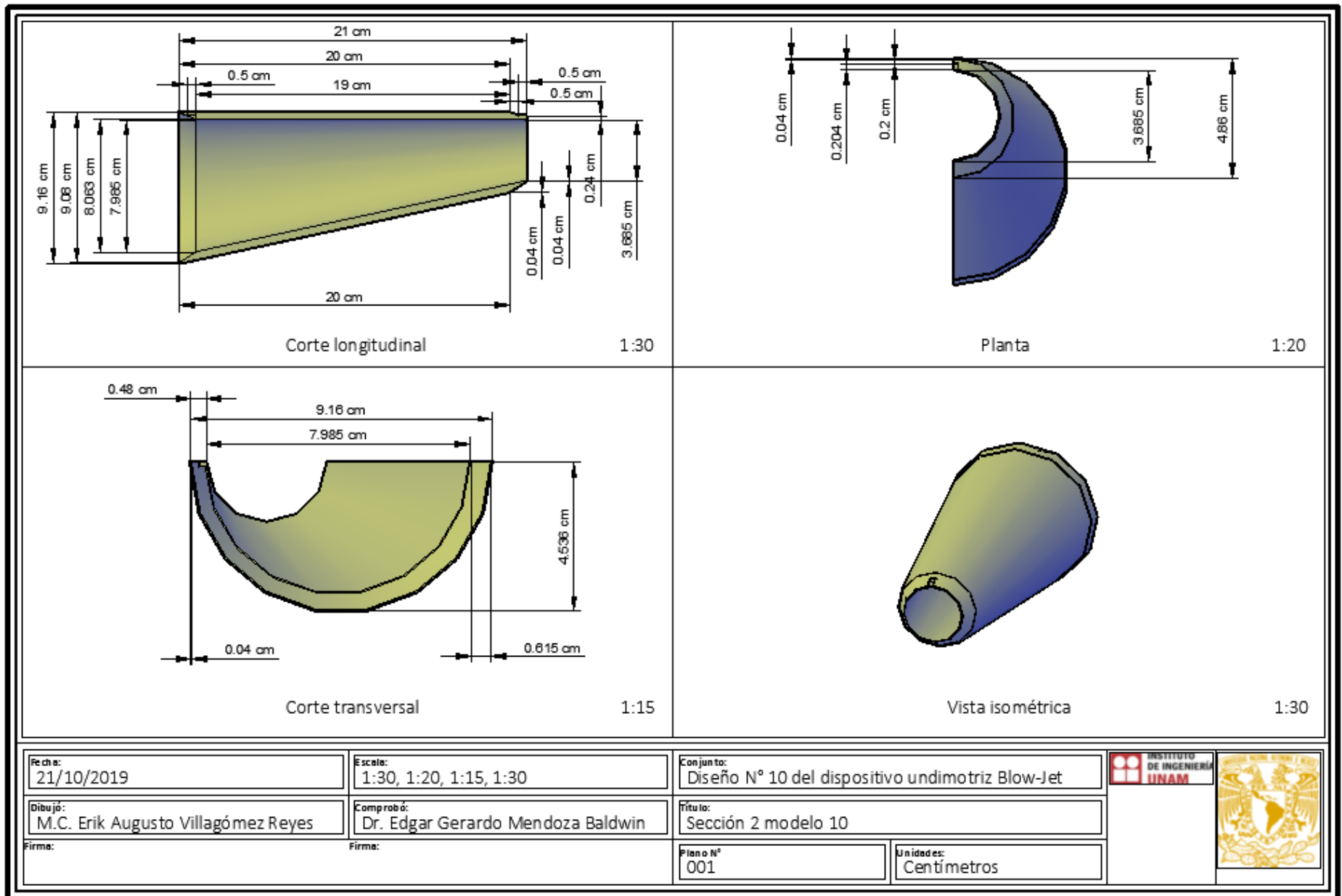


Figura 84 Plano mecánico de la 2da sección del modelo 10 para ensayos.

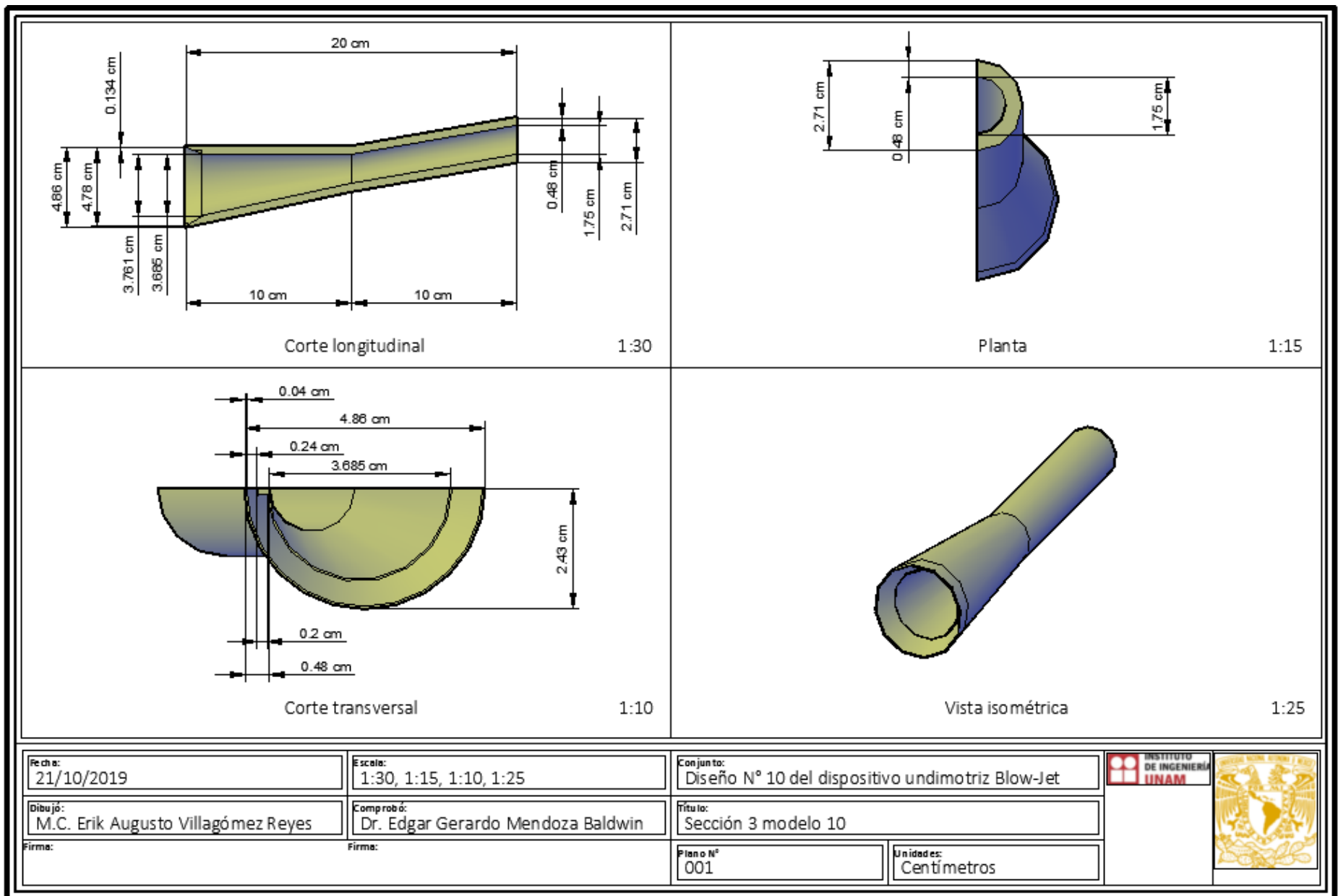


Figura 85 Plano mecánico de la 3er sección del modelo 10 para ensayos.

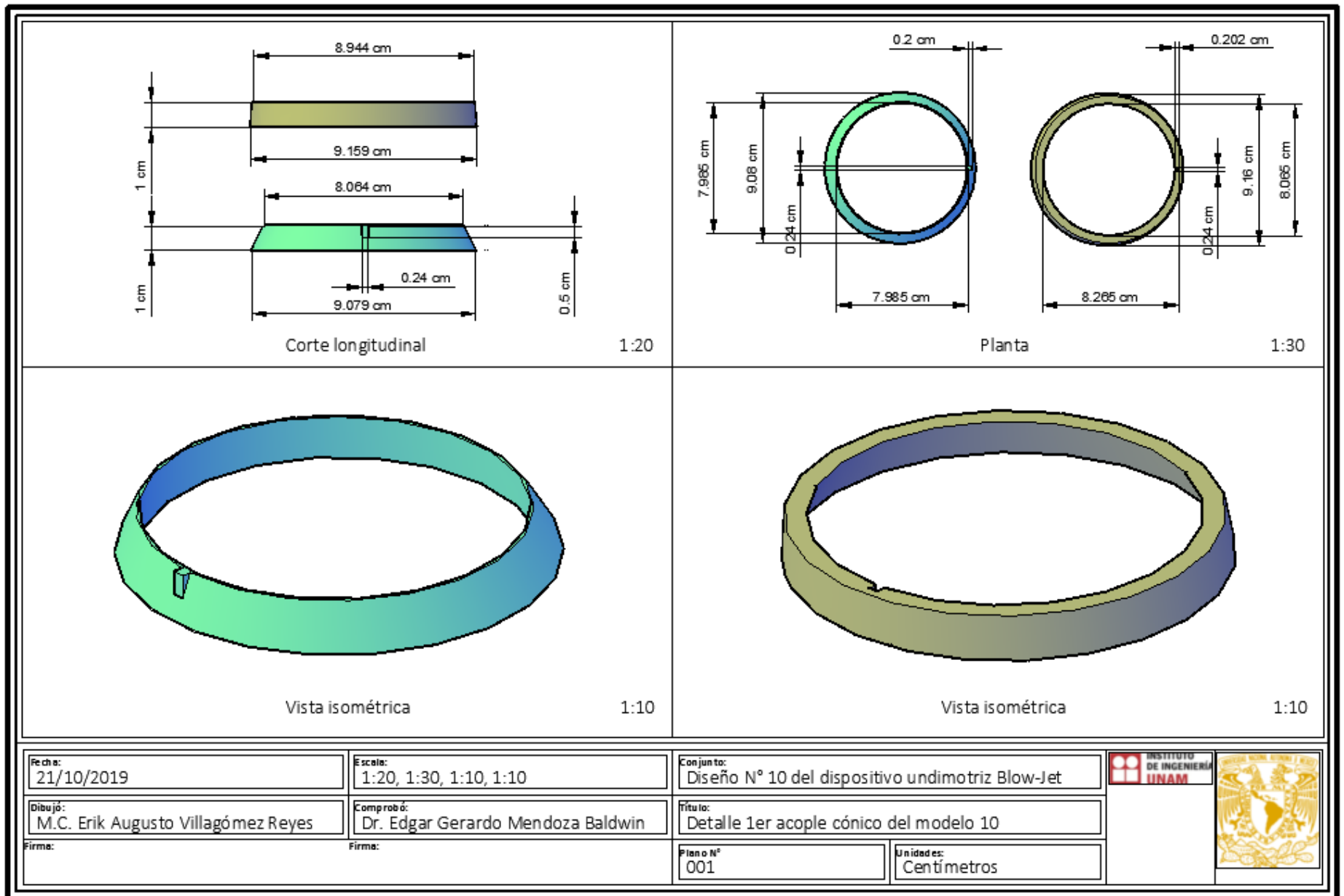


Figura 86 Plano mecánico del 1er acople cónico del modelo 10.

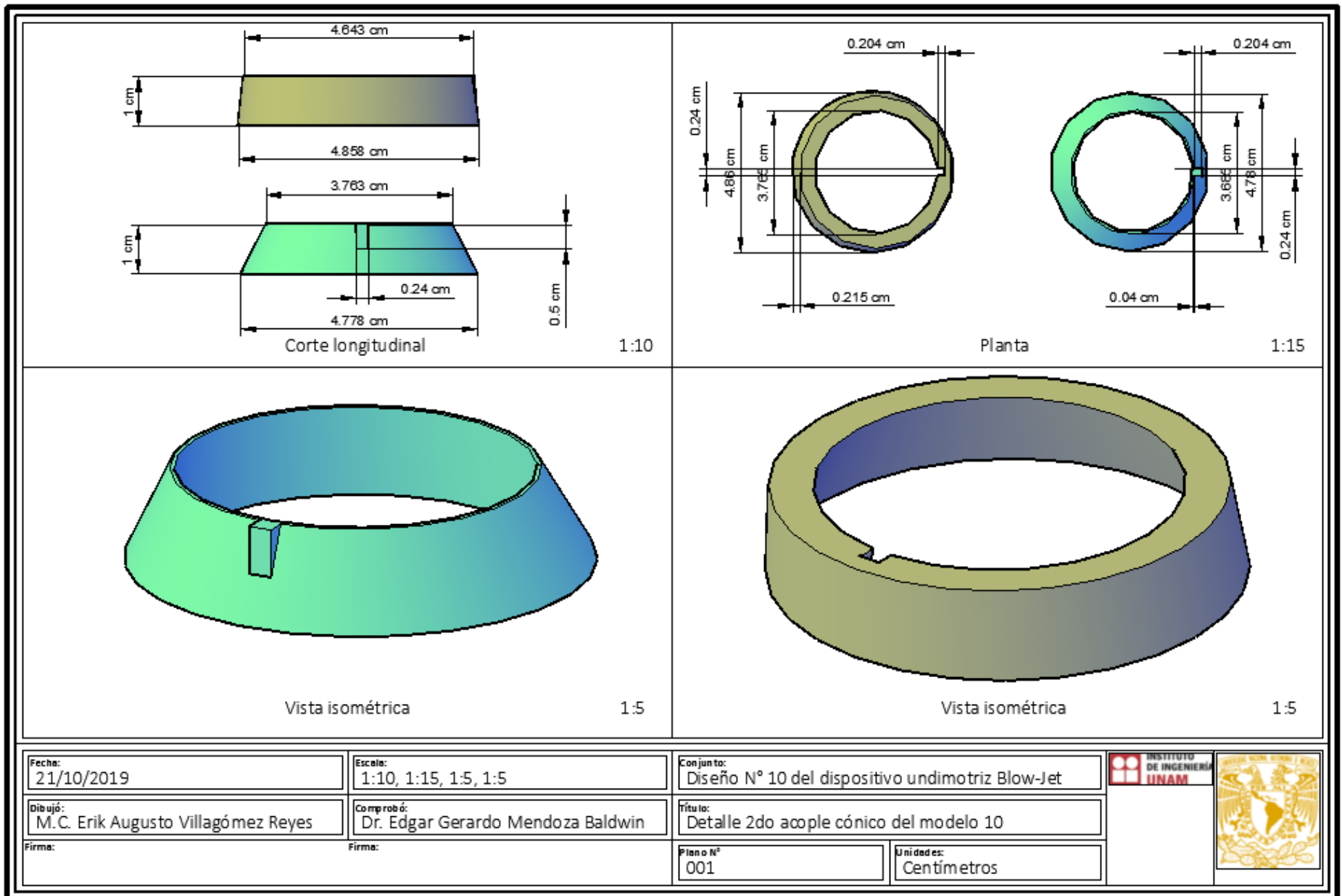


Figura 87 Plano mecánico del 2do acople cónico del modelo 10.

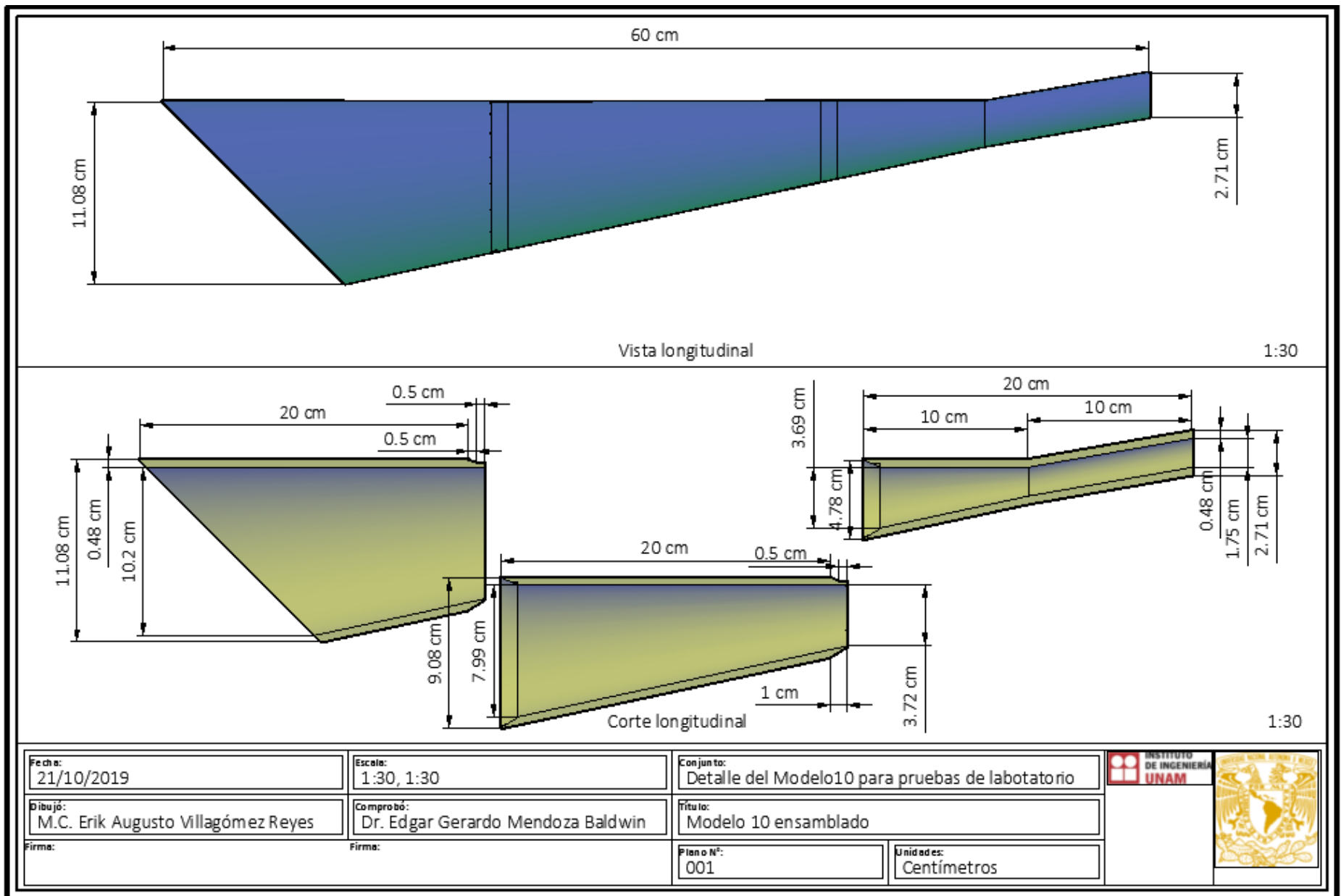


Figura 88 Plano mecánico del modelo 10 sometido a ensayos en el canal de oleaje.

5.4.1. PRESIÓN

Para la validación se usaron los parámetros de la prueba 1, parámetro de medición presión, oleaje regular de la tabla 9. Una vez procesados y escalados 1 a 1 los parámetros registrados del sensor de presión a la salida del dispositivo (P_s), de las pruebas de laboratorio se reportan en la tabla 13 junto a las presiones resultantes de las simulaciones, como se aprecia hay una ligera diferencia esta se debe a las perdidas por fricción y la vibración presente en los ensayos de laboratorio, fenómenos que no se presentan en el modelo numérico. Ya que no se pudo determinar la rugosidad del material y la porosidad del dispositivo terminado. La figura 89 presenta las presiones en el tiempo, la figura 90 presenta las presiones por separado.

Tabla 13 Muestra las presiones promedio y máximas del dispositivo.

ANÁLISIS	DISPOSITIVO	Ps max (Pa)	Ps media (Pa)
MODELO NUMÉRICO (FLOW3D)	Modelo10	8162.282	119.7418
PRUEBAS DE LABORATORIO	Modelo10	11631.569	111.2541

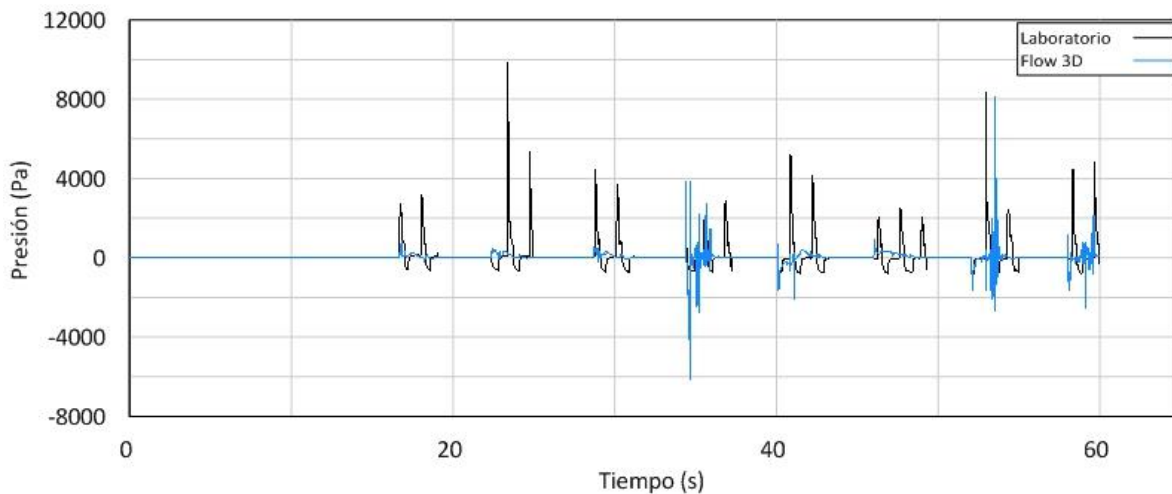


Figura 89 Presiones de la prueba de laboratorio y del modelo numérico.

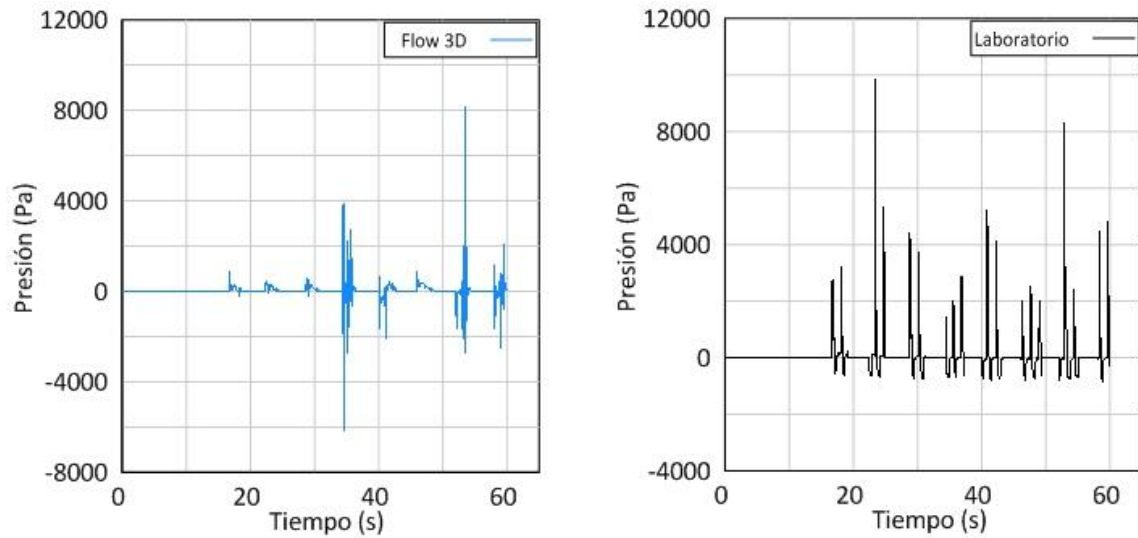


Figura 90 Presiones a la salida del dispositivo en el tiempo del modelo numérico izq. Presiones a la salida del dispositivo en el tiempo de la prueba de laboratorio der.

5.4.2. VELOCIDAD DE ENTRADA

Para la validación se usaron los parámetros de la prueba 2 de velocidad, oleaje regular. A continuación, se presenta las velocidades de entrada (V_e) al dispositivo, máximas y medias como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14 Velocidades de entrada del dispositivo tanto para la modelación numérica como para los ensayos de laboratorio.

ANÁLISIS	DISPOSITIVO	V_e max (m/s)	V_e media (m/s)
MODELO NUMÉRICO (FLOW3D)	Modelo10	1.2307	0.4193
PRUEBAS DE LABORATORIO	Modelo10	1.6296	0.4985

En la figura 91 se presenta la gráfica de las velocidades de entrada de los ensayos de laboratorio y de la simulación.

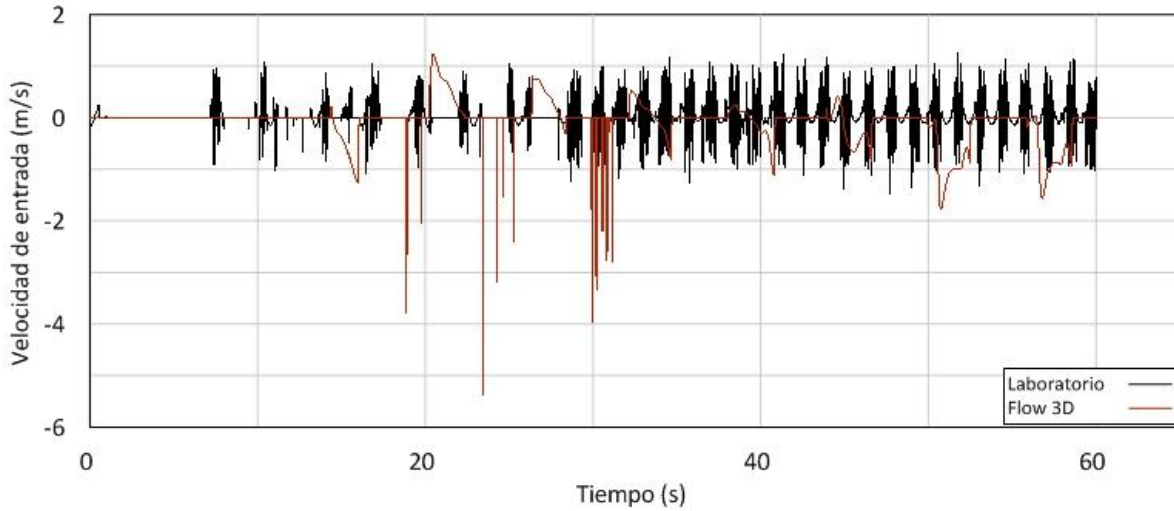


Figura 91 Velocidades de entrada del dispositivo modelo10 y ensayos.

La figura 92 presenta las velocidades en el tiempo del modelo numérico y laboratorio por separado.

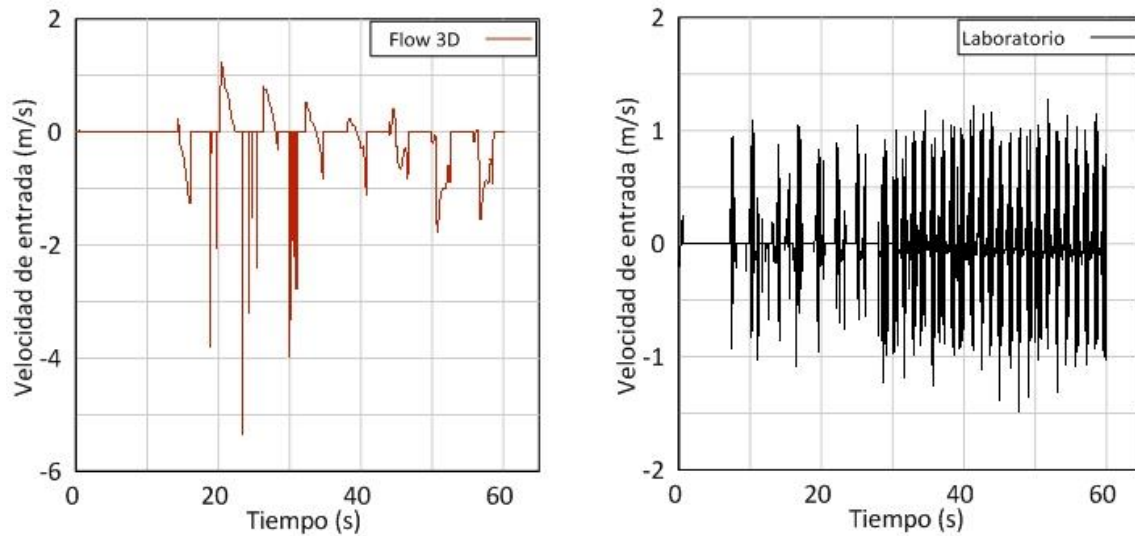


Figura 92 Velocidad de entrada en el tiempo del modelo numérico izq. Velocidad de entrada en los ensayos de laboratorio der.

5.4.3. VELOCIDAD DE SALIDA Y GASTO DE SALIDA

Se presentan las velocidades y gastos a la salida del dispositivo, para el registro de los gastos, se aforó el volumen a la salida del dispositivo y por las mismas limitaciones para

realizar dicho aforo, sólo se tiene el volumen promedio. Una vez procesados los registros se tienen velocidades y gastos puntuales en los ensayos. En la tabla 15 y 16 se presenta la velocidad y gasto de salida respectivamente.

Tabla 15 Velocidades de salida.

ANÁLISIS	DISPOSITIVO	Vs max (m/s)	V media (m/s)
MODELO NUMÉRICO (FLOW3D)	Modelo10	18.5961	1.2229
PRUEBAS DE LABORATORIO	Modelo10	0.7378	0.6955

Tabla 16 Caudales a la salida del dispositivo en (l/s).

ANÁLISIS	DISPOSITIVO	Qs max (l/s)	Qs medio (l/s)
MODELO NUMÉRICO (FLOW3D)	Modelo10	1789.1535	0.03943
PRUEBAS DE LABORATORIO	Modelo10	0.03968	0.0374

En la figura 93 se presenta el gasto y velocidad a la salida del dispositivo del modelo numérico respectivamente.

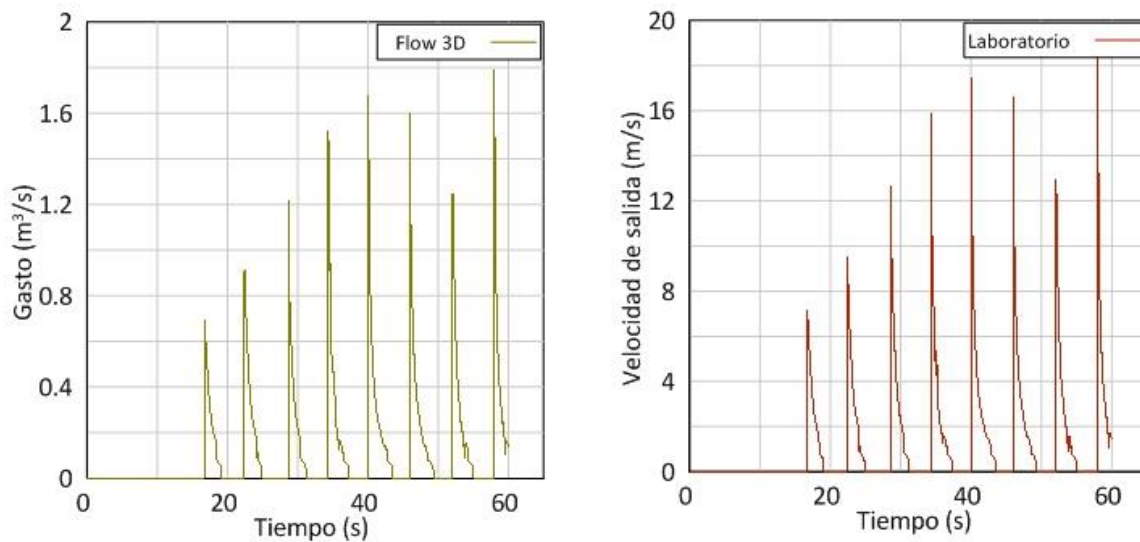


Figura 93 El gasto se muestra a la izq y la velocidad a la salida del dispositivo del modelo numérico der.

5.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ BLOW-JET CONTRA LOS RESULTADOS DEL DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ MODELO 10.

Se relacionan los resultados del dispositivo modelo 10 de la simulación y los ensayos de laboratorio prueba 1 y 2, con los obtenidos de la modelación numérica del Blow-Jet y se muestran en la tabla 17.

Tabla 17 Velocidades y presiones a la salida del dispositivo.

ANÁLISIS	DISPOSITIVO	Vs max (m/s)	Vs medio (m/s)	Ps max (Pa)	Ps media (Pa)
MODELO NUMÉRICO (FLOW3D)	Blow-Jet	4.708	0.2184	1438.947	12.848
	Modelo10	18.596	1.222	8162.282	25.011
PRUEBAS DE LABORATORIO	Modelo10	0.03968	0.0374	581.578	15.347

En la figura 94 se presenta las presiones de las modelaciones numéricas del dispositivo modelo 10 y del Blow-Jet.

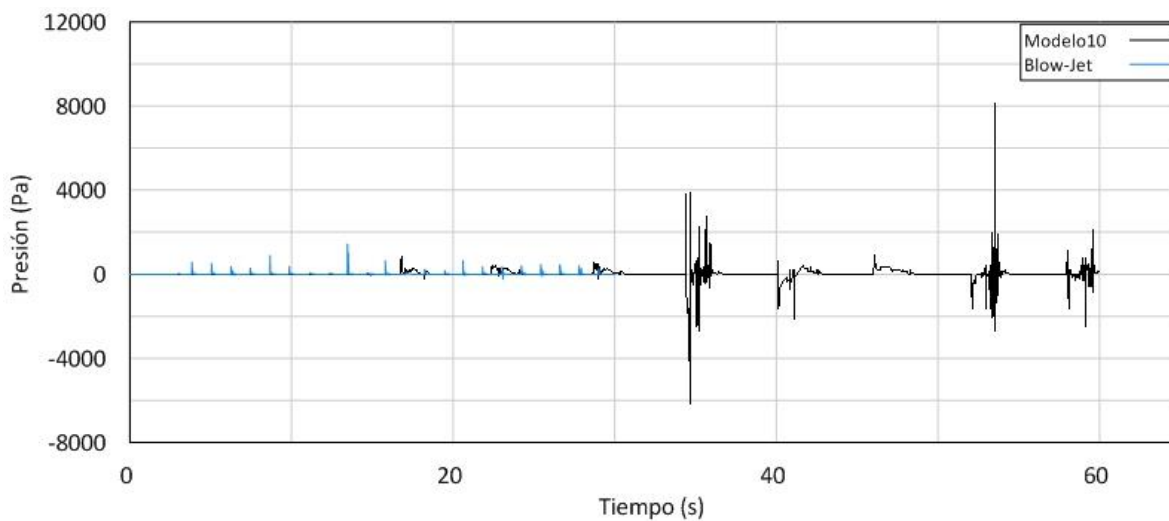


Figura 94 Presiones a la salida del dispositivo modelo10 y Blow-Jet.

La figura 95 muestra las presiones de los ensayos de laboratorio del modelo10 y las presiones de la simulación del Blow-Jet.

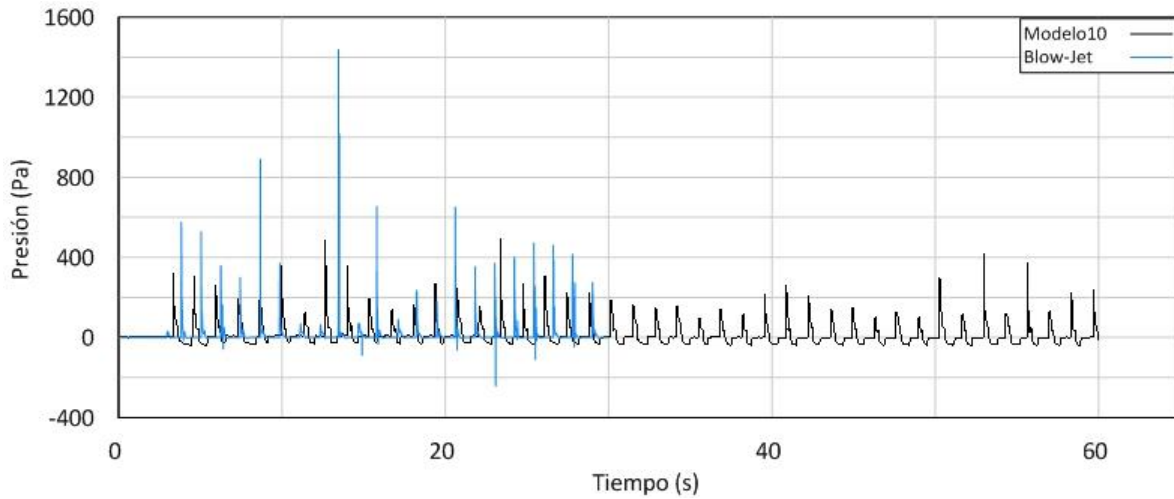


Figura 95 Presiones de la simulación del dispositivo Blow-Jet y de las obtenidas de los ensayos de laboratorio del modelo 10.

Las velocidades de salida del modelo 10 y Blow-Jet de los modelos numéricos se presentan en la figura 96.

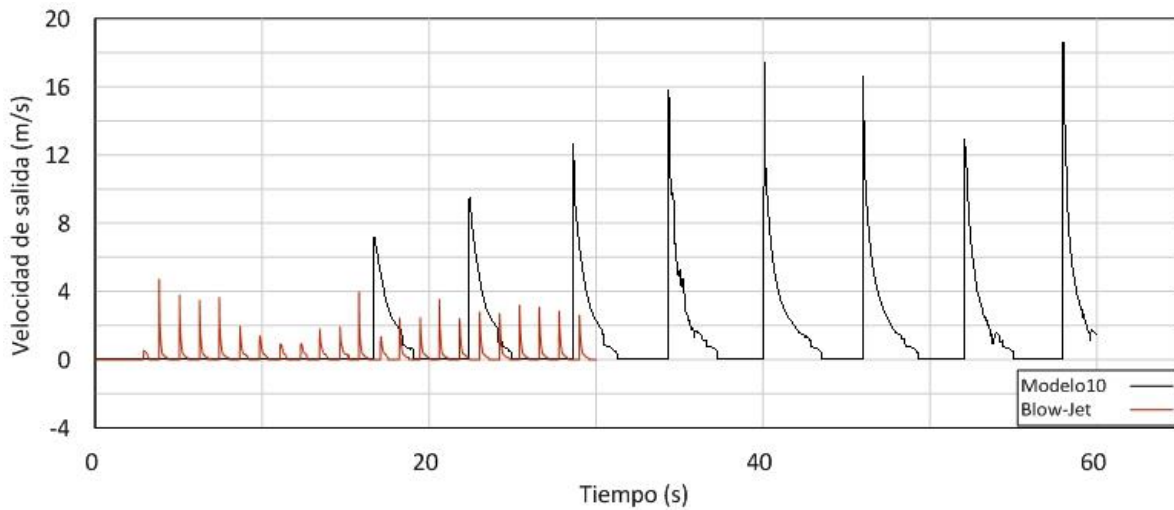


Figura 96 Muestra las velocidades a las salidas del modelo 10 y Blow-Jet de las simulaciones.

La figura 97 presenta las velocidades en la salida de los dispositivos modelo 10 y Blow-jet de las pruebas de laboratorio y simulación respectivamente.

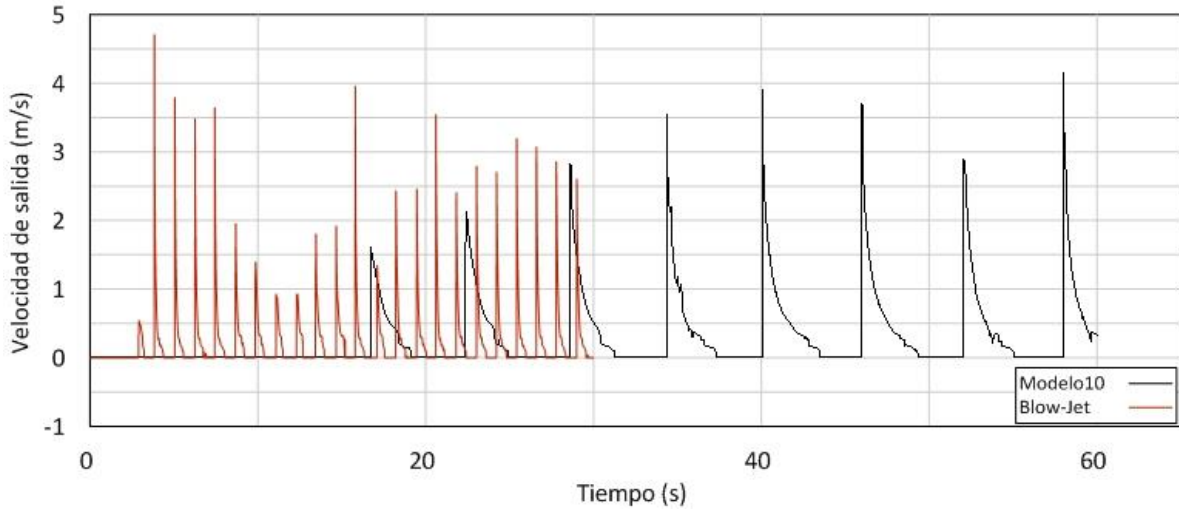


Figura 97 Velocidades de salida de los dispositivos modelo 10 y Blow-Jet.

5.6. FACTOR DE AMPLIFICACIÓN

A continuación, se presenta el factor de amplificación que es el cociente de la velocidad de salida y la velocidad de entrada, la figura 98 muestra la velocidad de entrada, velocidad de salida y factor de amplificación del modelo 10, prueba 2 de ensayos de laboratorio, con parámetro de registro: velocidad.

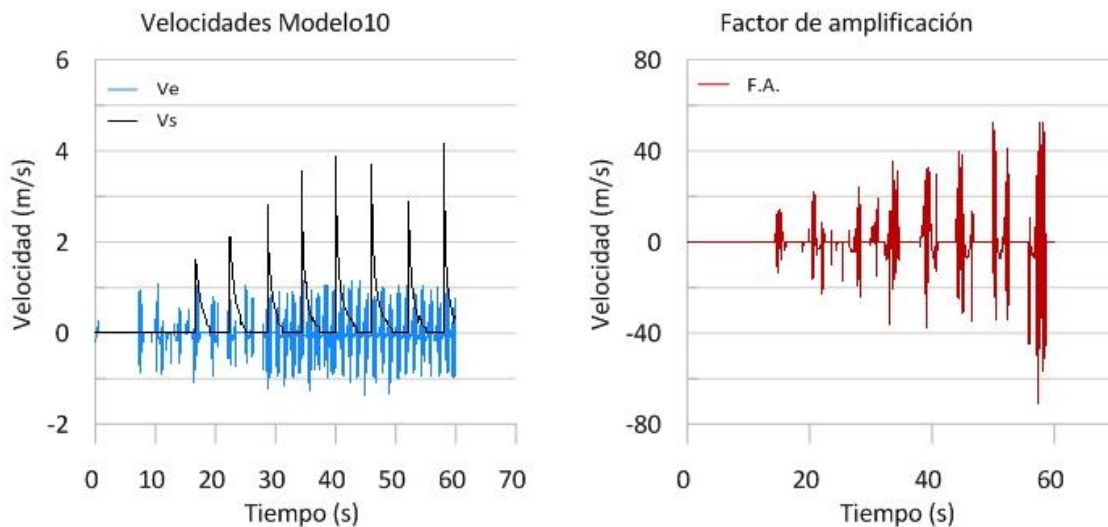


Figura 98 La gráfica de la derecha muestra la velocidad de entrada y salida del dispositivo modelo 10, la gráfica de la izquierda presenta el factor de amplificación.

Como se puede apreciar en las figuras la velocidad se observa un incremento con el paso del tiempo. Las velocidades a la salida del modelo 10 no pudieron ser registradas en los ensayos de laboratorio ya que el equipo de medición debe estar parcial o totalmente sumergido y la salida del modelo 10 queda por encima de la superficie libre del agua, por lo tanto el factor de amplificación se procesó, con las velocidades de salida de la simulación realizada con FLOW-3D, se utilizaron las velocidades de entrada obtenidas en las pruebas de laboratorio. Ya que el tiempo de registro es diferente se unificaron los tiempos para tener el mismo volumen de información. Se usaron los registros a una proporción 1:20.

Se determinan los factores de amplificación de los dispositivos modelo 10 y Blow-Jet, con el modelo numérico Flow-3D. La figura 99 muestra las velocidades de entrada y salida, de la simulación del modelo 10 con el modelo numérico Flow-3D. Se presentan las velocidades de entrada y salida de la simulación del Blow-Jet con Flow-3D, en la figura 100.

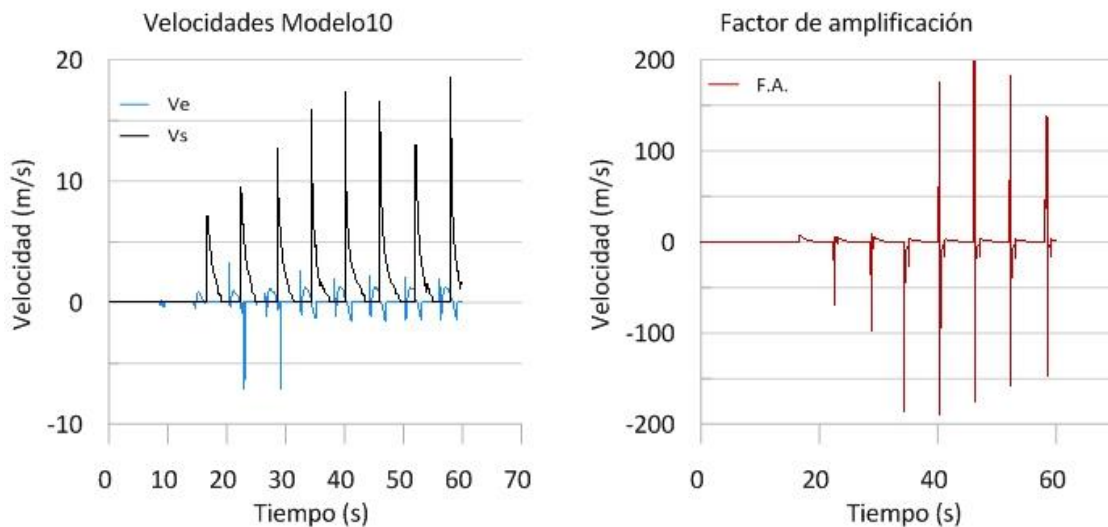


Figura 99 A la der. se muestra la velocidad de entrada y salida del dispositivo modelo 10, la gráfica de la izq. presenta el factor de amplificación.

El factor de amplificación presente es a relación 1:1, al igual que con el factor de amplificación a escala 1:20 el factor de amplificación es a la alza. A partir del segundo 25.5 aproximadamente el factor de amplificación se vuelve evidente.

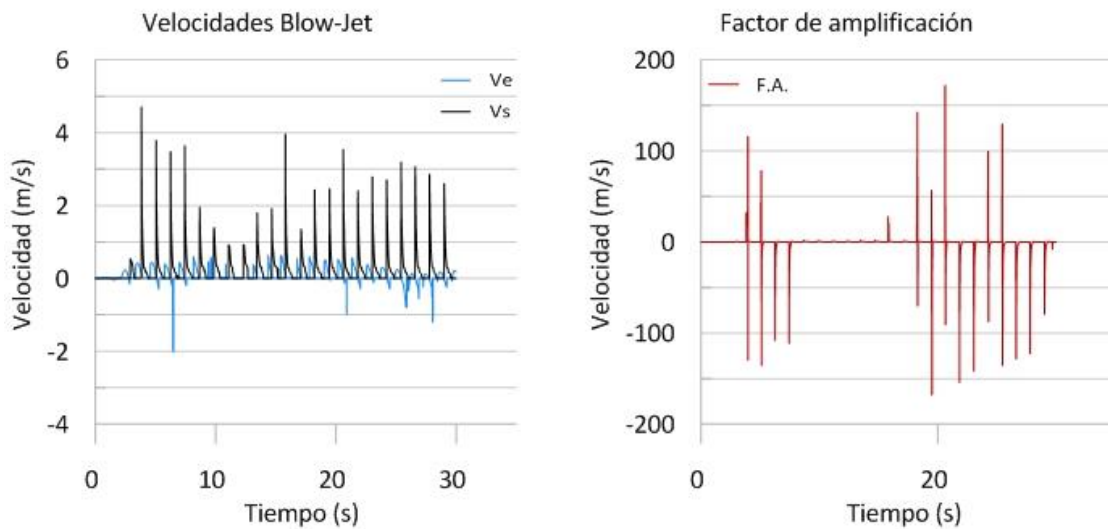


Figura 100 La figura de la der. muestra la velocidad de entrada y salida del dispositivo Blow-Jet, la gráfica de la izq. presenta el factor de amplificación.

El factor de amplificación en las velocidades del Blow-Jet se hace evidente a partir del segundo 9 y llegando al máximo al segundo 20.2 aproximadamente, esto se debe posiblemente al gran grado de reflexión que presenta el dispositivo Blow-Jet.

La figura 101 presenta los factores de amplificación antes mencionados para ello se escaló el factor de amplificación a una proporción de 1:20, dicha relación es la misma escala utilizada en la fabricación del modelo 10 utilizado para pruebas en el canal de oleaje.

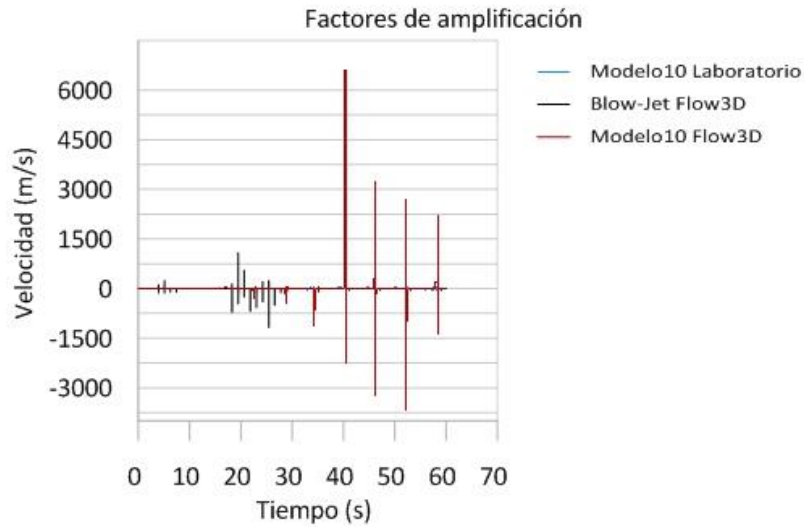


Figura 101 Compendio de factores de amplificación.

Es evidente que el factor de amplificación de la simulación del modelo 10 presenta el factor de amplificación más elevado debido a la escala, individualmente la mejor relación de factor de amplificación es la de la simulación del modelo 10 realizada en FLOW-3D.

5.7. MATRIZ DE POTENCIA PARA EL MODELO 10.

Por último, se presenta la matriz que se estructuró, con las potencias promedio y máximas en (w); procesadas a partir del grupo de ensayos con oleaje irregular, a escala 1:1 y 1:20 en la tabla 18.

Tabla 18 Potencias de operación para varios periodos y alturas de ola.

MATRIZ DE POTENCIA PROMEDIO EN (W), OLEAJE IRREGULAR							
LABORATORIO ESCALA 1:20	Altura de ola H (m)		ESCALA 1:1	Altura de ola H (m)			
	0.1	0.12		2	2.40		
Periodo T (s)	1.3416	0.00080113	N/A	Periodo T (s)	6.0	28.662	N/A
	1.4	N/A	0.001159523		6.3	N/A	41.4843698
	1.6	0.00032696	0.000383862		7.2	11.6976934	13.733427
	1.8	0.00055933	0.001464371		8.0	20.0111745	52.3908736
	2	0.00037468	0.001360603		8.9	13.405	48.6784107
	2.24	0.0001986	0.001581099		10.0	7.10523172	56.5670751
	2.68	0.00018956	0.006210101		12.0	6.78188884	222.179093
MATRIZ DE POTENCIA MÁXIMA EN (W), OLEAJE IRREGULAR							
LABORATORIO ESCALA 1:20	Altura de ola H (m)		ESCALA 1:1	Altura de ola H (m)			
	0.1	0.12		2	2.40		
Periodo T (s)	1.3416	0.01984592	N/A	Periodo T (s)	6.0	710.029	N/A
	1.4	N/A	0.033904513		6.3	N/A	1213.00845
	1.6	0.01725142	0.039816561		7.2	617.205976	1424.52125
	1.8	0.01730461	0.031079856		8.0	619.109388	1111.94744
	2	0.02018117	0.03178141		8.9	722.024	1137.04656
	2.24	0.02103023	0.040609121		10.0	752.40093	1452.87631
	2.68	0.03461537	0.189151403		12.0	1238.43781	6767.28887

5.8. SUPERFICIE LIBRE

A continuación, se presenta la gráfica resultante de la raw-data o datos en bruto de análisis temporal de la prueba 9, parámetro de medición presión, sensor 7, la figura 102 presenta una porción del registro y se aprecia la señal de registro y la corrección de la señal media aritmética. La figura 103 muestra el registro completo. En los anexos se presentan los registros ya procesados.

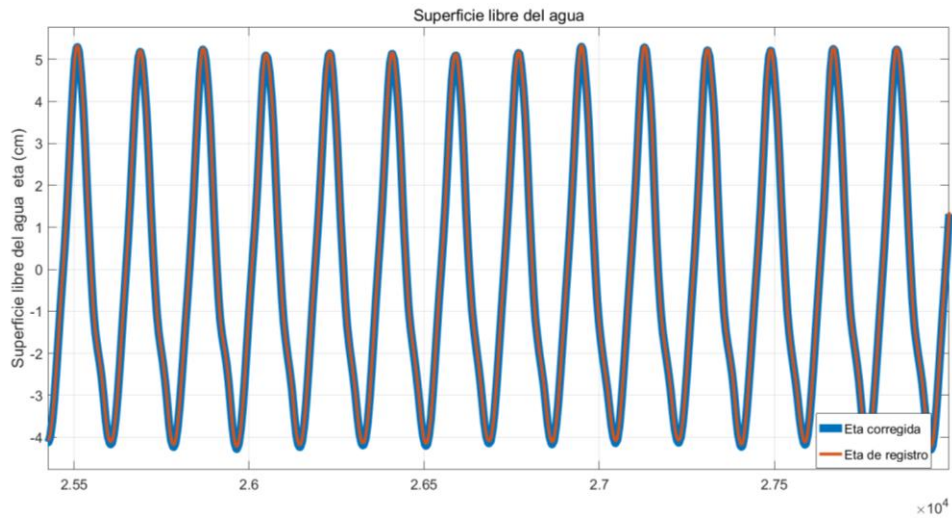


Figura 102 Registro en bruto, y registro con corrección aritmética.

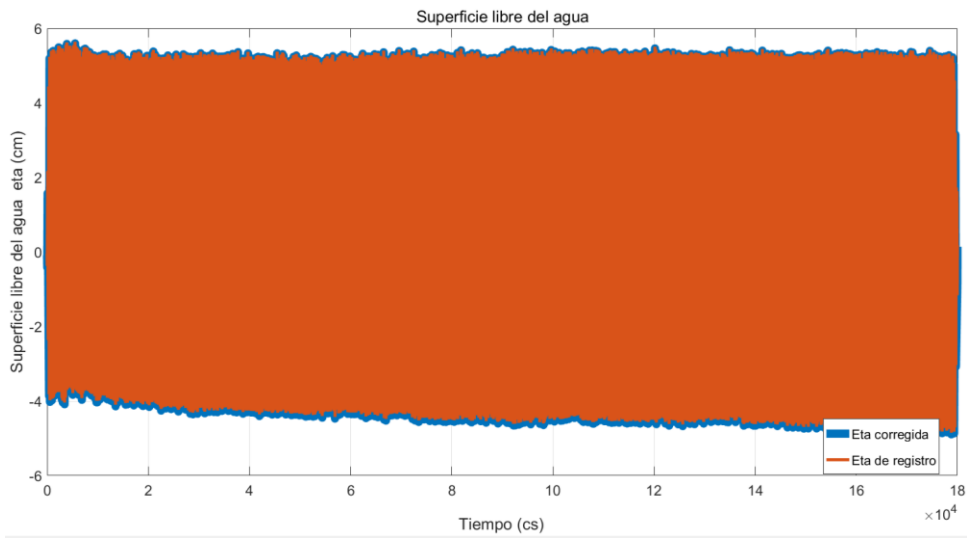


Figura 103 Registro completo.

PLANO MECÁNICO DE LA TURIBINA TIPO WELLS

La figura 104 presenta el plano mecánico del resultado del análisis teórico de la turbina tipo Wells se propone una turbina de 8 álabes con perfil NACA 18.

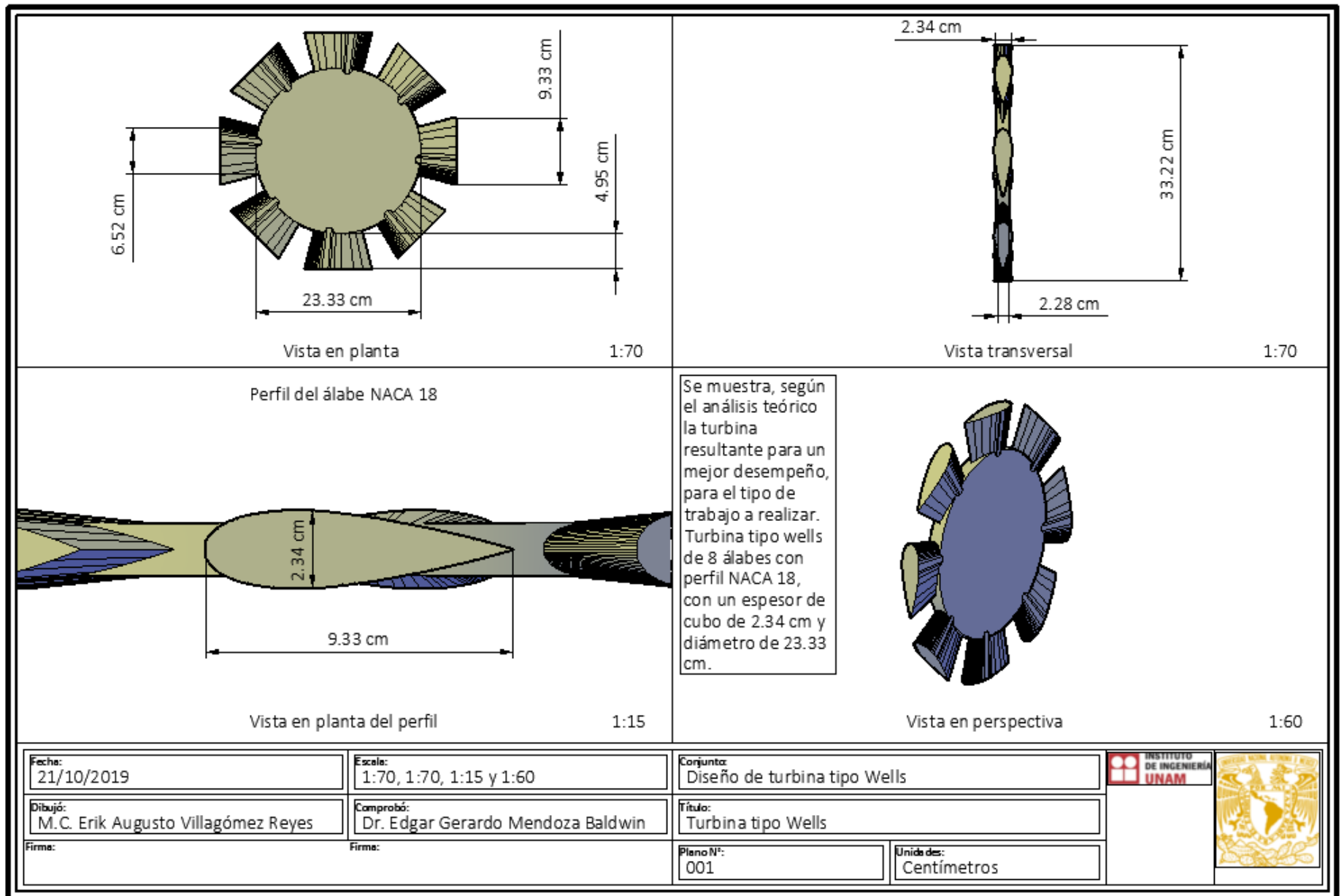


Figura 104 Plano mecánico de la turbina tipo Wells.

Capítulo VI

6. CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una de las principales diferencias entre el modelo 10 y el Blow-jet, es el comportamiento hidrodinámico, como recomienda Chávez (2010) “Simplemente con apreciar el comportamiento del Bolw-Jet en operación, una modificación en su diseño geométrico resulta evidente”; el modelo 10 se tiene una cadencia de onda más estable, menos caótica. Debido principalmente a la geometría, se logró disminuir de forma significativa la reflexión a la entrada del dispositivo y la ola no rompe dentro del dispositivo.

Puesto que las simulaciones del modelo numérico de los dispositivos modelo 1 a 16 se generan con las geometrías a una relación 1 a 1, en comparativa con el Blow-Jet que su génesis fue supeditado a las dimensiones del canal de oleaje, ergo, su relación de dimensiones es máxima por cuestiones de entorno, por ello al momento de escalar el Blow-Jet las dimensiones resultantes son inviables con respecto a operación.

Ya que la relación de diámetros (entrada salida) en el Blow-Jet es 17 veces mayor, al momento de escalar el dispositivo para captar oleajes de mayor altura y posicionando el dispositivo con las configuraciones de mayor eficiencia, conforme los resultados de Chávez; el área de operación de la entrada es enorme, por consiguiente, la probabilidad de comprometer el funcionamiento es mayor.

Debido a la forma de medición y a la adquisición de registros existen diferencias puntuales entre la información obtenida y mostrada en las pruebas realizadas por Chávez y la simulación del Blow-Jet que se realizó para este trabajo de investigación, Chávez como indica solo contabiliza chorros de 10 cm/s de velocidad, y el tiempo de registro y volumen de información no está especificado, aunado a que aplicó métodos indirectos de medición debido a su entorno y contexto, no hay puntos de comparación directos en cuanto a los

parámetros de presión velocidad y volumen. Por consiguiente se hace una comparación directa con la modelo numérico del Blow-Jet, generada en este trabajo.

El modelo 10 en cuanto a velocidad de salida máxima presenta un incremento del 395%, con respecto a la presión de salida máxima hay un incremento de 567%. En cuanto a las medias por ejemplo entre la velocidad de salida media hay una diferencia de 559% y en presión de salida media 194%.

Se validaron los datos obtenidos del modelo numérico del dispositivo modelo 10, con pruebas de laboratorio como parámetro tenemos la presión de salida promedio obtenida en laboratorio es de 111.2 Pa. La presión de salida promedio en el modelo numérico FLOW-3D es de 119.7 Pa, la diferencia deriva en la rugosidad del material y a la vibración que presentó la montura del dispositivo en el canal, durante los ensayos de laboratorio.

Como futuras líneas de investigación sugiero enfocarse en el sistema de anclaje o emplazamiento en sitio, caracterizar la turbina y aplicar un modelo numérico y pruebas experimentales, en cuanto a la parte hidrodinámica sugiero modelar el dispositivo modelo 10 con un diámetro menor, la relación entre diámetros es de 7 diámetros de diferencia, por limitaciones de hardware, no fue posible probar relaciones más grandes.

Gracias al trabajo de conceptualización y experimental que realizó Chávez con el Blow-Jet y partiendo de su trabajo, en general se concluye que el modelo 10 resulto tener un mejor desempeño que el Blow-Jet, la nueva geometría presenta dimensiones viables y conservadoras que podrían percibirse atractivas en cuanto a costos.

BIBLIOGRAFÍA

- Albert, A., Berselli, G., Bruzzone, L., & Fanghella, P. (2017). Mechanical design and simulation of an onshore four-bar wave energy converter. *Renewable Energy*, 114, 766–774. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.089>
- Amundarain, M. (2012). La energía renovable procedente de las olas. *Ikastorratza, e-Revista de Didáctica*, (8), 1–14. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4098958&info=resumen&idioma=BAQ>
- Bahaj, A. S. (2011). Generating electricity from the oceans. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3399–3416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.032>
- Brooke, J., & ECOR. (2003). *WAVE ENERGY CONVERSION* (R. BHATTACHARYYA & M. E. McCORMICK, Eds.). ELSEVIER OCEAN ENGINEERING BOOK SERIES VOLUME 6.
- Chávez Cárdenas, X. (2010). “BLOW-JET”, *TECNOLOGÍA OCEANOMOTRIZ DE LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA DEL OLEAJE (WEC), EN SUS ETAPAS: CONCEPTO DE DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPO A ESCALA EN UN CANAL DE OLAS*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Chow, V. Te. (1994). *HIDRÁULICA DE CANALES ABIERTOS* (S. Martha, Ed.). Mc Graw Hill.
- Chozas, J. F., Kramer, M. M., Sørensen, H. C., & Kofoed, J. P. (2012). Combined Production of a full-scale Wave Converter and a full-scale Wind Turbine – a Real Case Study. *International Conference on Ocean Energy 2012*, 1–7.
- Coastal Enigneering Research Center DEPARTMENT OF THE ARMY Waterways Experiment Station, C. of E. (1984). SHORE PROTECTION MANUAL VOLUME I. In D. DEPARTMENT OF THE ARMY US Army Corps of Engineers Washington (Ed.), *US Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center* (4 th, Vol. 1). <https://doi.org/10.5962/bhl.title.47830>
- CONAGUA. (2019). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO DATOS BÁSICOS PARA PROYECTOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO* (1ERA ed.; CONAGUA, Ed.). Retrieved from www.conagua.gob.mx
- Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(8), 887–902. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE782>
- Durst, F. (2008). *Fluid mechanics: An introduction to the theory of fluid flows* (English Tr; Springer, Ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71343-2>
- Fenton, J. D. (1985). A FIFTH-ORDER STOKES THEORY FOR STEADY WAVES. *Ocean Engineering*, 1(2), 216–234.
- Folley, M., & Whittaker, T. J. . T. (2009). Analysis of the nearshore wave energy resource. *Renewable Energy*, 34(7), 1709–1715. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.003>
- Gato, L. M. C., & Falcão, A. F. de O. (1984). On the Theory of the Wells Turbine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 106(3), 628. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2007.08.003>
- Henderson, R. (2006). Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy*, 31(2), 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.021>
- Henriques, J. C. C., Gato, L. M. C., Falcão, A. F. O., Robles, E., & Faÿ, F. X. (2016). Latching control of a floating oscillating-water-column wave energy converter. *Renewable Energy*, 90, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.065>

- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters* (1st ed.; CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Ed.). New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- Kofoed, J. P., Frigaard, P., Friis-Madsen, E., & Sørensen, H. C. (2006). Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable Energy*, 31(2), 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.09.005>
- Lagoun, M., Benalia, A., Benbouzid, M., Wave, O., & State, C. (2011). *Ocean Wave Converters : State of the Art and Current Status To cite this version : Ocean Wave Converters : State of the Art and Current Status*.
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martínez De Alegría, I., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 413–434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- Maria-Arenas, A., Garrido, A. J., Rusu, E., & Garrido, I. (2019). Control strategies applied to wave energy converters: State of the art. *Energies*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/en12163115>
- Mendoza, E., Chávez, X., Alcéraca-Huerta, J. carlos, & Silva, R. (2015). HYDRODYNAMIC BEHAVIOR OF A NEW WAVE ENERGY CONVERTER: THE BLOW-JET. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(1), 23–42.
- Ning, D., Zhou, Y., & Zhang, C. (2018). Hydrodynamic modeling of a novel dual-chamber OWC wave energy converter. *Applied Ocean Research*, 78(June), 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.06.016>
- Polinder, H, Mecrow, B. C., Jack, A. G., & Dickinson, P. (2003). Linear generators for direct-drive wave energy conversion. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 19(3), 583–589.
- Polinder, Henk, Damen, M. E. C., & Gardner, F. (2004). Linear PM Generator for wave energy conversion in the AWS. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 19(3), 309–313.
- Polinder, Henk, Gardner, F., & Vriesema, B. (2000). Linear PM Generator for wave energy conversion in the AWS. *ICEM*, 19(3), 309–313.
- Reyna, M., Espinosa, E., Federico, D., Rubio, M., & Sánchez, C. D. (n.d.). *Generación De Energía Eléctrica*.
- Science, F. (2012). FLOW-3D (11.1.0) User Manual. Flow Science Inc. In *Flow Science Inc*.
- Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. In UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (Ed.), *Serie Docencia*. CIUDAD DE MÉXICO: INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *HIDRÁULICA GENERAL VOLUMEN 1 FUNDAMENTOS* (18th ed., Vol. 1; noriega editores, Ed.). México: LIMUSA.
- The Queen's University of Belfast. (2002). Islay Limpet Wave Power Plant. In *THE EUROPEAN COMMISSION In the framework of the Non Nuclear Energy Programme*. Retrieved from https://cordis.europa.eu/docs/publications/6662/66628981-6_en.pdf
- USACE. (2008). Chapter 1 WATER WAVE MECHANICS. In *Part II* (Vol. 1100). UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS.
- Wark, K., & Richards, D. (2001). *TERMODINÁMICA* (6ta ed.). Mc Graw Hill.

ANEXO A

El presente anexo se muestran las alturas cuadráticas medias tanto por análisis temporal como espectral para las 76 pruebas, es decir, el registro de los 8 sensores de los ensayos realizados para el registro de los parámetros de presión, velocidad y volumen para oleaje regular como irregular, los datos de los registros se trataron y calcularon con los scripts desarrollados en Matlab para este trabajo de investigación.

