

Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencia del Mar

CARACTERIZACION NUMERICO-EXPERIMENTAL DEL FLUJO
BIDIMENSIONAL ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACION
DE UN BUQUE SARDINERO

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:
INGENIERO NAVAL

Presentado por:
Douglas Ulises Güingla Villón

GUAYAQUIL - ECUADOR

2009

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme cada día la fuerza y la perseverancia para lograr mis metas y objetivos que me he impuesto en la vida.

AL Dr. José R. Marín López, por su apoyo y colaboración en el desarrollo de esta tesis, al Centro de Investigaciones de Ingeniería Naval por su ayuda incondicional con los gastos para la elaboración de los modelos físicos, a todos los profesores de la carrera de Ingeniería Naval por transmitirme sus sabios conocimientos.

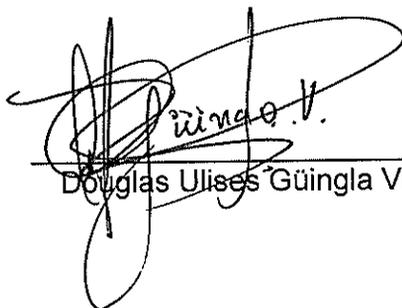
DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico principalmente a mis padres Carmen y Vicente por inculcarme siempre sus buenas costumbre y estar conmigo en mis mejores y peores momento de mi vida, a mi hermano Alex y a mi tío Ottón por ayudarme en mi formación profesional y confiar siempre en mi, a todos mis hermanos especialmente a Rommel y Mayra por estar siempre a mi lado, a Sara por haberme entregado su confianza y cariño desinteresadamente, a mis amigos y demás familiares que esperaban este momento con esperanza y alegría.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)



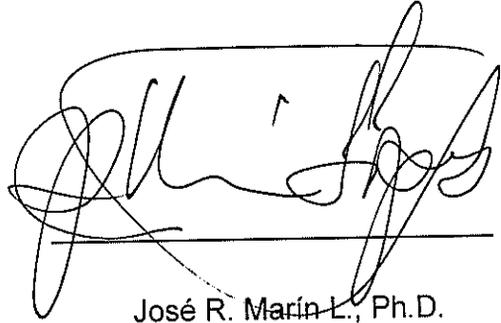
Douglas Ulises Güingla Villón

TRIBUNAL DE GRADO

x 

Jerry Landívar Zambrano, M.Sc.

Presidente del Tribunal



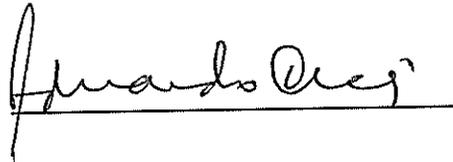
José R. Marín L., Ph.D.

Director de Tesis



Bolívar Vaca R., M.Sc.

Miembro Principal



Eduardo Orcés P., M.Sc.

Miembro Principal

INDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN	I
ÍNDICE GENERAL	II
ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
INTRODUCCIÓN	V

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LA CAPA LÍMITE Y LA GENERACIÓN DE VÓRTICES ALREDEDOR DE CUERPOS BIDIMENSIONALES.

1.1 Descripción de flujos laminares y turbulentos alrededor de cuerpos.....	2
1.2 Descripción del fenómeno la Separación de la Capa Límite.....	6
1.3 Descripción de la Ecuación de la Conservación de Momentum....	11

CAPÍTULO 2

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAMPO DE VELOCIDADES ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACIÓN.

2.1 Geometría y Construcción de los modelos.....	19
2.2 Proceso Experimental para la obtención de los campos de velocidades.....	26
2.3 Análisis del campo de velocidad de cada plano de flotación.....	34

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN NUMÉRICA DEL CAMPO DE VELOCIDADES ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACIÓN.

3.1 Partición del Dominio para la Modelización Numérica.....	45
3.2 Detalles del proceso de Modelización Numérica.....	52
3.3 Campos de velocidad obtenidos para cada plano de flotación....	56

CAPÍTULO 4
COMPARACIÓN DE LOS ANÁLISIS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS.

4.1 Comparación de resultados Numéricos y Experimentales.....	67
4.2 Comparación entre Planos de Flotación.....	80

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

APÉNDICE A.

Descripción y Uso del Sistema de Anemometría Laser Doppler, LDA (Laser Doppler Anemometry)

APÉNDICE B.

Visualización del Campo de velocidades del Flujo alrededor de los Planos de Flotación WP1, WP2, y WP3, obtenidos experimentalmente.

APÉNDICE C.

Visualización del Campo de velocidades del Flujo alrededor de los Planos de Flotación WP1, WP2, y WP3, obtenidos Numéricamente.

APÉNDICE D.

Distribución de presiones alrededor de los planos de Flotación WP1, WP2, y WP3, obtenidos de forma numérica.

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla # I	Leyes Físicas asociadas a los fenómenos de transferencias 11
Tabla # II	Descripción de los parámetros obtenidos en las pruebas experimentales 31
Tabla # III	Parámetros Experimentales para WP3 32
Tabla # IV	Parámetros Experimentales para WP2 32
Tabla # V	Parámetros Experimentales para WP1 32
Tabla # VI	Números de Reynolds para cada prueba 33
Tabla # VII	Características del modelo para la simulación numérica... 45
Tabla # VIII	Configuración de las mallas para los planos de flotación... 51
Tabla # IX	Condiciones de contornos en la simulación de flujos de fluidos 54
Tabla # X	Tiempo de ejecución en la simulación para los modelos numéricos representativos de los planos de flotación 55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.		Pág.
1.-	Esquema del tanque de Ensayos de Reynolds	2
2.-	Fotografía de los diferentes regímenes de flujo	4
3.-	Comparación de los flujos a altos y bajos números de Reynolds alrededor de una Placa Plana	7
4.-	Perfiles de Velocidad y separación de la Capa Límite a lo largo de un cuerpo bidimensional	9
5.-	Fenómeno de la generación y movimiento de los Vórtices	10
6.-	Fuerzas de superficie en dirección del eje coordenado "x"	12
7.-	Carenamiento del Buque Sardinero Cavinko I, año 2007	19
8.-	Plano de Líneas de Formas, Cavinko I	20
9.-	Diagrama Tridimensional del Buque Sardinero Cavinko I	22
10.-	Dimensionamiento a escala para los modelos físicos	23
11.-	Proceso de elaboración de los modelos físicos	24
12.-	Etapa final de los modelos que representan a los planos de flotaciones escogidos para el análisis Experimental	25
13.-	Sistema LDA acoplado al canal de experimentación	26
14.-	Función de la probeta del sistema LDA	27
15.-	Esquema del sistema de medición utilizando la técnica LDA ...	28
16.-	Malla y Tamaño de cuadrícula para cada Planos de Flotación	29
17.-	Origen y dirección del movimiento de la probeta para la obtención de los datos	30

18.-	Cortes a diferente posición longitudinal para el análisis de la influencia del campo de velocidad para el plano de flotación 3	34
19.-	Velocidades medias x en tres cortes para el Plano de Flotación 1	35
20.-	Velocidades medias x en tres cortes para el Plano de Flotación 2	38
21.-	Velocidades medias x en tres cortes para el Plano de Flotación 3	41
22.-	Geometría de los planos de flotación para la Simulación Numérica.....	47
23.-	Malla de los Plano de Flotación para la Simulación Numérica	50
24.-	Esquema de las condiciones de contorno para la Simulación Numérica	53
25.-	Solución numérica de las velocidades x en tres cortes para el Plano de Flotación 1	56
26.-	Solución numérica de las velocidades x en tres cortes para el Plano de Flotación 2	59
27.-	Solución numérica de las velocidades x en tres cortes para el Plano de Flotación 3	62
28.-	Cortes "x" en el campo de velocidades del flujo para la comparación Numérico-Experimental	67
29.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 390$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.04$ m/seg	68
30.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 450$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.04$ m/seg	68
31.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 390$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.6$ m/seg	70

32.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 450$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.6$ m/seg	70
33.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 440$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.04$ m/seg	72
34.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 500$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.04$ m/seg	72
35.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 440$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.6$ m/seg	74
36.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 500$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.6$ m/seg	74
37.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 470$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.04$ m/seg	76
38.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 530$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.04$ m/seg	76
39.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 470$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.6$ m/seg	78
40.-	Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 530$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.6$ m/seg	78
41.-	Esquematzación de la distribución de presiones sobre la superficie de un plano de flotación	80
42.-	Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para $U=0.04$ m/seg	81
43.-	Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para $U=0.2$ m/seg	82

44.-	Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para $U=0.4$ m/seg	83
45.-	Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para $U=0.6$ m/seg	84
46.-	Comparación de la Resistencia Residual entre Planos de Flotación	87

RESUMEN

En la presente tesis se ha desarrollado el análisis del flujo bidimensional alrededor de tres Planos de Flotación de un buque sardinero con dos chinás, sin considerar el efecto de superficie libre. Basándose en la revisión bibliográfica, se describe el fenómeno de generación de vórtices alrededor de superficies sólidas bidimensionales, para comprender dicho fenómeno.

Se determinaron los flujos bidimensionales mencionados, primero experimentalmente con la técnica LDA, en el canal de circulación de la FIMCM; el rango de velocidad analizada fue 0.04-0.6 m/seg y los tres modelos empleados, se construyeron de 40 cm de longitud, aproximadamente. Luego con el programa de simulación numérica COMSOL, que discretiza espacialmente el dominio con el método de Elementos Finitos, se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son de tipo no lineal y no se pueden resolver analíticamente.

Para el análisis de resultados se graficaron las distribuciones de velocidad en cortes verticales, en la entrada al dominio, en Sección Media, y, en la zona de Popa. En la zona de Popa se nota la formación de la estela, que se manifiesta con una reducción en velocidad, que llega al cambio en dirección, denominado Contraflujo. Los resultados Experimentales y Numéricos mostraron tanto tendencia como amplitudes parecidas, que se acercan conforme se incrementa la velocidad de entrada. De manera que se ha comprobado la eficacia del método numérico empleado en este caso.

Finamente se integraron las presiones numéricas sobre las superficies de los modelos, y se sumaron las componentes horizontales, lo que corresponde a la Resistencia de Presión. Se encontró mucha similitud en la tendencia de esta Fuerza, en los planos de flotación que incluyen las chinás.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los flujos alrededor del casco de buques, es de gran importancia en el área de la Ingeniería Naval. Una forma de empezar este estudio es mediante el análisis bidimensional simplificado del campo de velocidades alrededor de planos de flotación. El fluido lejos de la superficie sólida puede considerarse prácticamente ideal, mientras que el fluido cercano al cuerpo es considerado viscoso, región conocida comúnmente como capa límite, **Streeter (2000)**. En la parte delantera, el flujo dentro de la capa límite se comporta en forma de capas, pero en la parte posterior la capa límite se encuentra con presiones crecientes, desprendiéndose de la superficie del cuerpo, **White (1991)**, por lo que la generación de los vórtices se propaga a lo largo del flujo.

La solución analítica del flujo alrededor de cuerpos como se describe en el párrafo anterior es difícil de obtener, motivo por el cual se recurren a métodos experimentales. Un estudio experimental del flujo simplificado bidimensional, puede usar un canal de recirculación y emplear técnicas tales como: Tubo Pitot, LDA "Laser Doppler Anemometry", entre otras conocidas. La ventaja del LDA es la no intrusión, que mejora la precisión de los resultados obtenidos, y permite la automatización del instrumento de medición alrededor del campo fluido, **DANTEC DYNAMICS (2006)**. En la actualidad gracias al

avance tecnológico se disponen de herramientas de análisis numérico, cuya solución es un complemento de los resultados experimentales.

En el área de la Mecánica de los Fluidos, las herramientas CFD (Computational Fluid Dynamics), permiten obtener soluciones numéricas de flujos alrededor de superficies sólidas. En ellas se reemplazan las ecuaciones de conservación de Momentum por expresiones algebraicas aproximadas al campo fluido, **Anderson (1995)**. El paquete computacional COMSOL 3.4, permite calcular numéricamente el campo de velocidades alrededor de planos de flotación de buques, empleando la técnica de Elementos Finitos, **COMSOL (2007)**.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LA CAPA LÍMITE Y LA GENERACIÓN DE VÓRTICES ALREDEDOR DE CUERPOS BIDIMENSIONALES.

El presente capítulo presenta una breve ilustración del mecanismo de visualización de los regímenes laminares y turbulentos, además de las características principales que estos flujos involucran y el fenómeno de la separación de la capa límite alrededor de cuerpos bidimensionales. Se describen luego las ecuaciones que gobiernan al movimiento de los fluidos mediante la ley de la Conservación de Momentum; estas ecuaciones junto con las de Continuidad definen las ecuaciones más importantes en la Dinámica de los Fluidos, conocidas generalmente como ecuaciones de Navier-Stokes.

1.1 Descripción de flujos laminares y turbulentos alrededor de cuerpos.

Las investigaciones de O. Reynolds utilizando la visualización de flujos en conductos, establecieron la presencia de varios regímenes con características particulares, [1], ver figura (1). Aún cuando dicho experimento se diferencia del que se pretende analizar aquí, se lo va a resumir porque ayuda a visualizar el proceso de formación de vórtices en flujos viscosos.

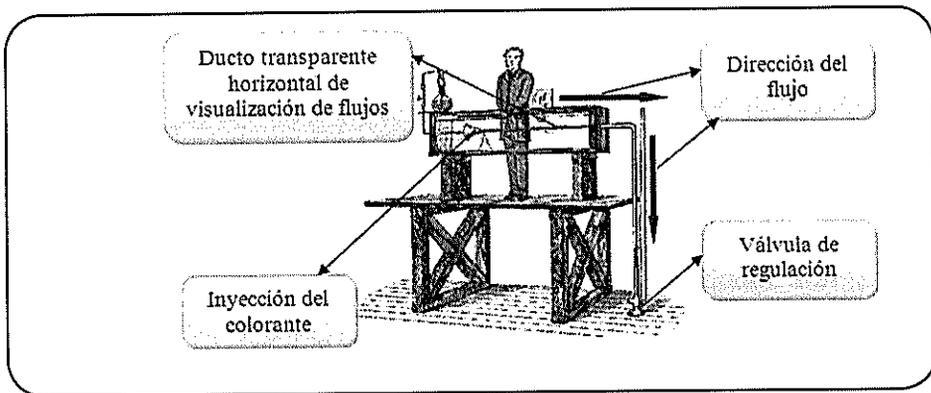


Figura 1. Esquema del tanque de Ensayos de Reynolds, [1].

Como se puede observar en la figura 1, para poder visualizar las características de los flujos, Reynolds empleó un método que inyecta colorante en una corriente de agua en el interior del tanque, a través de un conducto transparente horizontal el cual está unido a una tubería de desagüe. La circulación del agua en los ductos se debe a la diferencia entre la superficie libre del tanque y el desagüe; el ducto de desagüe al nivel del piso contiene una válvula para regular el caudal del agua desalojada, es decir la velocidad de la corriente.

Para poder facilitar una circulación regular de agua, Reynolds empleó una boquilla o embudo. En la zona de la boquilla se inyecta el colorante a través de una manguera, el cual está conectado en el exterior del tanque a un depósito que contiene el colorante. Una vez que el agua circula regularmente en el ducto, la válvula es ajustada para lograr ciertas velocidades de corriente.

Reynolds observó que solo existe un movimiento estable y regular, si la velocidad del flujo es muy pequeña, o, el diámetro del conducto transparente horizontal es pequeño para un caudal dado. Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito el colorante que pasa por el ducto, forma una línea horizontal bien definida, logrando amortiguar rápidamente cualquier perturbación que aparezca en el flujo. Este movimiento se lo denomina **Laminar**.

Sin embargo si la velocidad del flujo es lo suficientemente grande, cualquier perturbación produce irregularidades y pierde su carácter estacionario. El grosor del colorante crece rápidamente y su contorno toma formas irregulares, hasta que aguas abajo se convierte en una nube. Este movimiento se lo denomina **Turbulento**.

A través del conducto transparente horizontal se pueden visualizar los diferentes regímenes de flujo observados en los ensayos de Reynolds, como se puede apreciar en la figura (2).

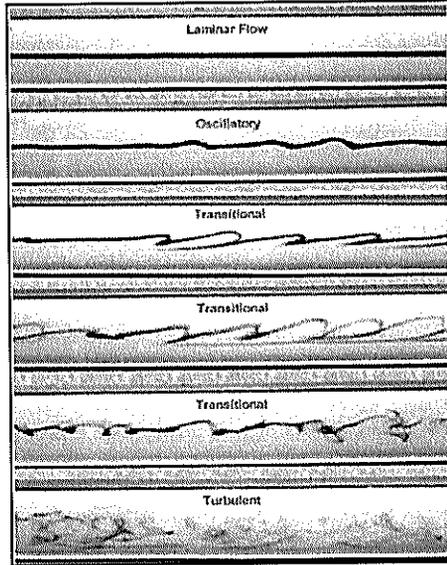


Figura 2. Fotografía de los diferentes regímenes de flujo, [2].

El parámetro fundamental que permite distinguir entre el régimen laminar y turbulento, es conocido como número de Reynolds, el cual se define como el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, [3]:

$$Re = \frac{F. Inercial}{F. Viscosa} = \frac{(Presión Dinámica) \times (\text{área})}{(Esfuerzo viscoso) \times (\text{área})} = \frac{\rho V^2 L^2}{(\mu V / L) L^2} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

Donde L es la longitud característica descriptiva del campo de flujo.

ρ = Densidad del fluido,

μ = Viscosidad dinámica, y,

V = Velocidad de la corriente.

En un flujo cuando dos partículas se encuentran en movimiento, existe un gradiente de velocidad si una partícula se mueve más rápido que la otra. La presencia de estos gradientes desarrollan fuerzas tangenciales (Fuerzas Viscosas) que se oponen al movimiento relativo entre las partículas, estas fuerzas son proporcionales al gradiente de velocidad y la viscosidad dinámica del fluido (Ley de Newton) [2].

Si se tiene gradientes de velocidad en zonas de baja velocidad, las fuerzas viscosas predominan sobre las fuerzas de inercia. Entonces cualquier perturbación impuesta en el flujo es rápidamente estabilizado por las fuerzas viscosas. Esto es lo que sucede en el flujo **laminar**, en el que las partículas siguen un movimiento ordenado en forma de capas o láminas.

Si se tiene gradientes de velocidad en zonas de alta velocidad, las fuerzas viscosas pierden su valor relativo respecto a las fuerzas de inercia; en esta condición las perturbaciones no logran ser estabilizadas por las fuerzas viscosas y crecen, dando origen a vórtices que son arrastrados por la corriente. En este tipo de flujo, denominado **Turbulento**, las partículas siguen un movimiento totalmente desordenado.

1.2 Descripción del fenómeno la Separación de la Capa Límite.

A principio de este siglo, en 1904, el científico alemán Ludwing Prandtl demostró que los flujos viscosos se pueden analizar dividiéndolos en dos regiones. Una región delgada alrededor de superficies sólidas denominada Capa Límite, en donde los efectos friccionales son de mucha importancia, y otra zona que cubre el resto del flujo, donde dichos efectos son despreciables. Al flujo en esta última zona se la conoce como Potencial.

Para el caso de los fluidos en movimiento alrededor de superficies suficientemente largas, el flujo en el interior de la capa límite es laminar inicialmente. A medida que la corriente avanza aguas abajo, la capa crece a lo largo de la superficie, apareciendo una región de transición y finalmente el flujo en la capa límite se torna turbulento. La secuencia **Laminar-Transición-Turbulencia** ocurre siempre que la superficie sólida del cuerpo sea lo suficientemente larga, independientemente de que si la corriente libre es Laminar o Turbulenta, [4].

En la figura 3 tomada de [5], muestra el flujo alrededor de una placa plana. Para bajos números de Reynolds, la región viscosa se extiende ampliamente como se muestra en la figura 3 (a), la placa frena a la corriente incidente. Para altas velocidades, las capas viscosas, tanto laminares como turbulentas, son muy delgadas, como se aprecia en la figura 3 (b).

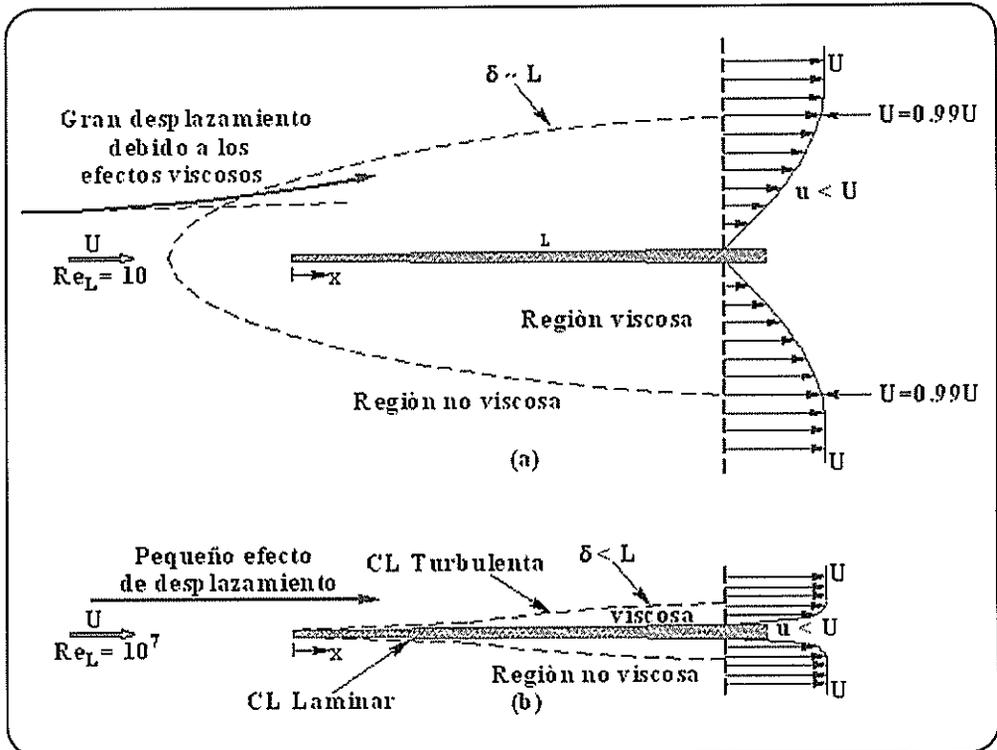


Figura 3, Comparación de los flujos a altos y bajos números de Reynolds alrededor de una Placa Plana, [5].

El espesor δ de la capa límite se define como [5], "el lugar geométrico de los puntos donde la velocidad u paralela a la placa alcanza el 99 % del valor de la velocidad exterior U ". El aumento del espesor de la capa límite depende del incremento de la presión en la dirección del flujo, este comportamiento se observa aguas abajo en la parte posterior del cuerpo.

El ejemplo de la placa plana proporciona una buena idea del comportamiento de la capa límite laminar y turbulenta. Ahora se describirá un aspecto de mayor interés, la separación de la capa límite. Cuando el fluido cerca de la frontera es retardado continuamente, puede llegar a invertir la dirección de la velocidad. Para este caso la condición de Continuidad requerirá que el fluido en la capa límite sea desviado de tal forma que se aparta de la pared del sólido. Este fenómeno es conocido como separación de la Capa Límite.

Un aspecto importante cuando ocurre la separación de la capa límite, es la presencia de un gradiente adverso de presión en la parte posterior del cuerpo sólido, esto es $dp/dx > 0$. En el caso en que la presión decrece, se tienen un gradiente favorable de presión, esto es $dp/dx < 0$, en este caso no se presentaría ninguna separación. En la figura 4 se describe el efecto del gradiente de presión en la dirección el flujo en los perfiles de velocidad de una capa límite alrededor de la superficie de un cuerpo sólido, [6].

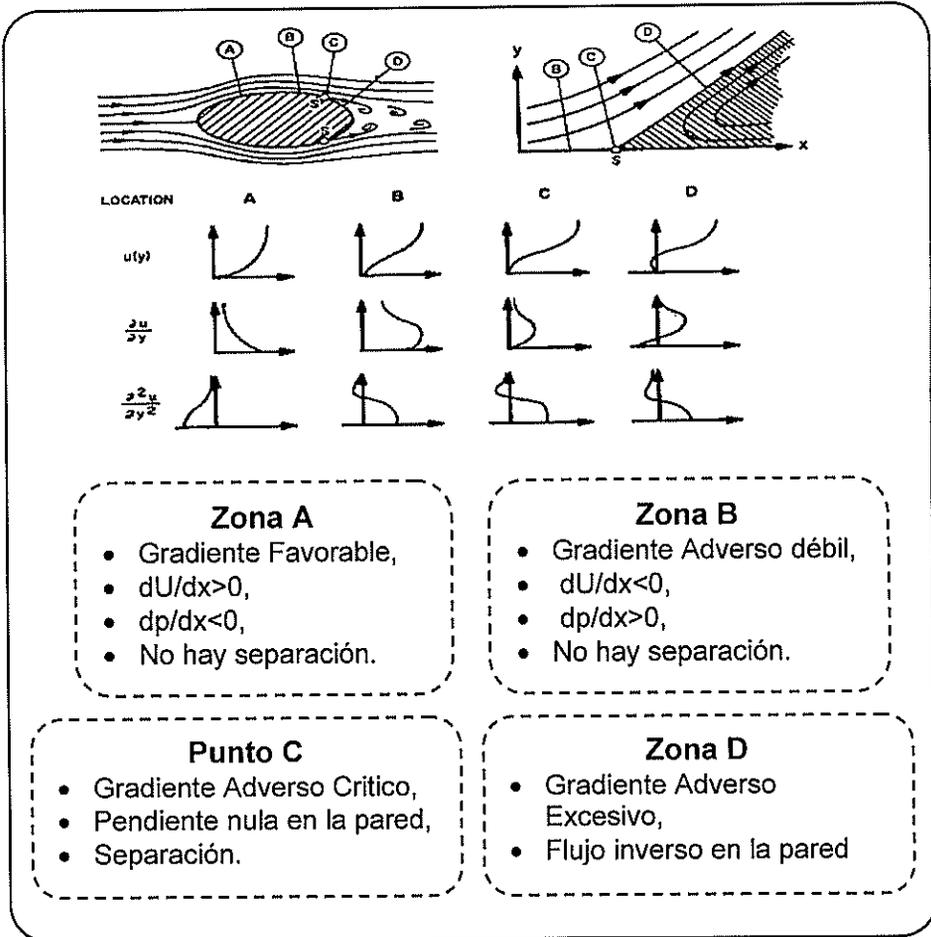


Figura 4, Perfiles de Velocidad y separación de la Capa Límite a lo largo de un cuerpo bidimensional, [6].

En el punto C se observa el punto crítico en el cual ocurre la separación de la capa límite. En este punto un gradiente puede ocasionar corriente inversa en la pared de cualquier superficie; a partir de este punto el espesor de la capa límite crece considerablemente y la corriente principal se desprende de la pared, [5].

En la zona posterior del cuerpo sólido, la capa límite generadas comienzan a separarse de la superficie del cuerpo, debido a que la parte en contacto con la superficie sólida se mueve más lentamente que la parte que está en contacto con el flujo libre. La capa límite separada se enrolla, generando una serie de vórtices discretos, [7]. Los vórtices generados en las paredes son arrastrados corriente abajo dentro de la estela generada por el paso del cuerpo en el fluido. Este fenómeno se puede observar en la figura 5.

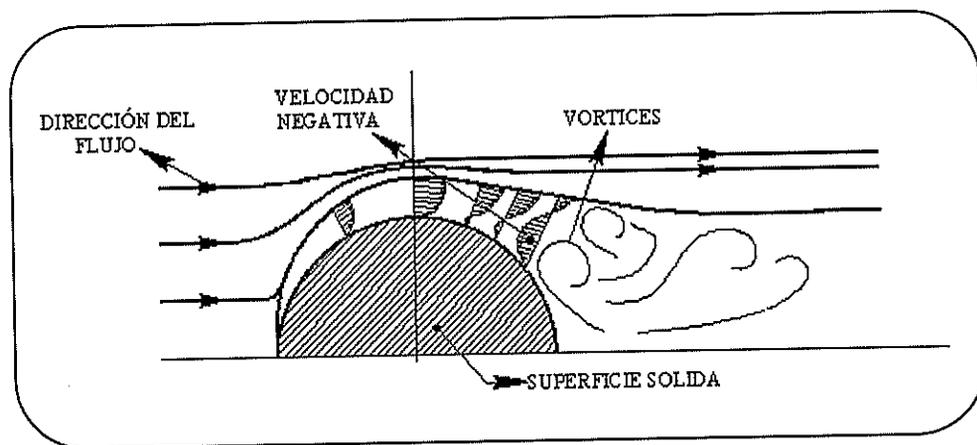


Figura 5, Fenómeno de la generación y movimiento de los Vórtices.
[Fuente: Elaboración Propia]

1.3 Descripción de la Ecuación de la Conservación de Momentum.

Antes de describir las ecuaciones de la conservación de Momentum, se deben mencionar ciertos aspectos importantes sobre los llamados fenómenos de transferencia. Los fenómenos de gran interés en el estudio del comportamiento dinámico de los fluidos se muestran a continuación, [8]:

1. La capacidad de los fluidos en movimiento de transportar material y propiedades de un lugar a otro, denominado proceso de Convección.
2. El mecanismo por medio del cual los materiales y propiedades se transmiten a través de un medio fluido, denominado proceso de Difusión o Conducción.

Los procesos fundamentales que están asociados con el comportamiento dinámico de los fluidos, son la transferencia de masa, calor y cantidad de movimiento. Para cada proceso existe una ley física asociada tal como se describe en la siguiente Tabla I.

<i>PROCESO</i>	<i>LEY FISICA ASOCIADA</i>
Transferencia de Masa	Conservación de la Materia
Transferencia de Calor	Conservación de la Energía
Transferencia de la cantidad de movimiento	Segunda ley de Newton (ecuación de movimiento)

Tabla I: Leyes Físicas asociadas a los fenómenos de transferencias [8].

Las ecuaciones que representan las leyes de la Conservación son conocidas como ecuaciones de gobierno de la Dinámica de Fluidos, y describen el movimiento del fluido bajo la acción de las tensiones a las que son sometidos. Estas ecuaciones se derivan de la aplicación de la ley de la conservación de Momento Cinético a un elemento infinitesimal del fluido, estas últimas ecuaciones se originan al aplicar la segunda ley de Newton (Fuerza = masa \times aceleración). Esta es una forma de expresar la segunda ley de Newton. Por conveniencia se analizarán las fuerzas actuantes sobre un elemento infinitesimal del fluido en movimiento, la distribución de fuerzas se puede observar en la figura 6.

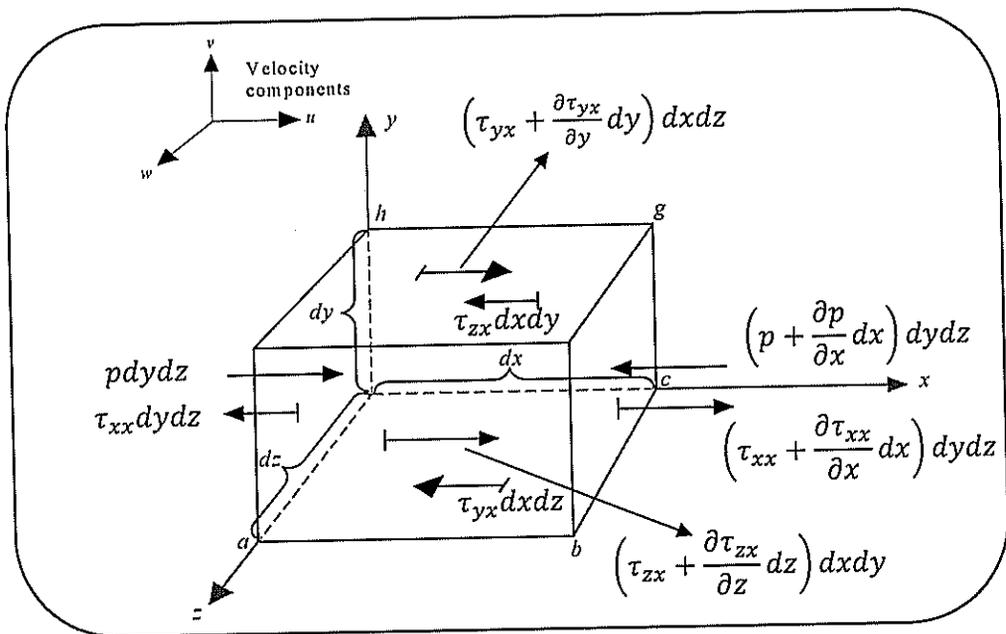


Figura 6, Fuerzas de superficie en dirección del eje coordenado "x", [9]

Entre las fuerzas actuantes se clasifican dos tipos de fuerzas tales como:

- **Fuerzas de cuerpo:** Actúan a distancia directamente sobre la masa incitando en el volumen del elemento (gravedad, eléctrico, magnético), para nuestro caso solo se consideran las fuerzas gravitacionales.
- **Fuerzas de Superficie:** Actúan por interacción directa de la superficie con el medio circundante, esto se debe a dos fuentes:
 - a) Presión externa (Esfuerzos Normales).
 - b) Efectos viscosos (Esfuerzos cortantes).

La fuerza de cuerpo en dirección x se expresa como:

$$f_x dm = f_x (\rho dx dy dz)$$

donde f_x = Fuerza por unidad de masa.

La fuerza de superficie debido a la presión, "p", actúa siempre hacia adentro comprimiendo las paredes del elemento y los esfuerzos normales y de corte, τ_{ij} , en un fluido están relacionados a la razón de deformación angular del elemento infinitesimal.

De acuerdo a la figura 5 la fuerza resultante en la dirección "x" queda expresada de la siguiente manera:

Fuerza resultante en "x" =

$$\left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dydz + \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dydz + \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dx dz + \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dx dy \quad (2)$$

Simplificando y cancelando términos en la ecuación (2) se tiene la siguiente expresión para la componente de la fuerza total del elemento diferencial.

$$\partial F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dx dy dz + f_x \rho (dx dy dz) \quad (3)$$

De la 2ª ley de Newton aplicada al elemento diferencial en la componente x se tiene:

$$\partial F_x = (\partial m) a_x = a_x \rho (dx dy dz) \quad (4)$$

Como se está analizando un elemento de fluido, este puede sufrir aceleraciones por defectos locales o convectivos. Para evaluar la aceleración se debe aplicar la derivada sustancial.

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (5)$$

Luego se combinan las ecuaciones (3), (4) y (5), dando como resultado las ecuaciones de la Conservación de Momentum.

Componente "x" de la ecuación de la Conservación de Momentum:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (6)$$

Componente de la ecuación en la dirección "y":

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (7)$$

Componente de la ecuación en la dirección "z":

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (8)$$

Las ecuaciones (6) a (8), son ecuaciones diferenciales parciales obtenidas de un principio físico fundamental, aplicado a un elemento infinitesimal en su forma No Conservativa, es decir, asumiendo que el elemento fluido se mueve con el flujo. A estas expresiones se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes.

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden ser expresadas en su forma Conservativa, reemplazando la parte izquierda de las ecuaciones por la definición de la derivada sustancial como se expresa a continuación.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) \quad (9)$$

El desarrollo de esta expresión se puede observar en la referencia [9]. Sustituyendo la ecuación (9) en las ecuaciones (6) a (8) se tiene las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma Conservativa.

Componente "x" de la ecuación Navier-Stokes en su forma conservativa:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (10)$$

Las otras componentes tienen forma similar, a continuación se explica las características de cada término de las ecuaciones de Navier-Stokes:

$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}$	+	$\nabla \cdot (\rho u V)$	=	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$	+	ρf_x
<p>Variación del momentum en el tiempo de un elemento diferencial del fluido "dV".</p>		<p>Sumatoria del momentum que entra en el "dV" menos la sumatoria del momentum que sale del "dV".</p>		<p>Sumatoria de las fuerzas tangenciales y normales sobre las caras del "dV".</p>		<p>Sumatoria de fuerza de volumen que actúan sobre el "dV"</p>

Las ecuaciones de Navier-Stokes, "están representadas por un sistema de 3 ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales de segundo orden con 4 incógnitas. Añadiendo la ecuación de continuidad (que se deriva de la aplicación de la ley de Conservación de Masa a un elemento infinitesimal de fluido), se obtiene la ecuación que falta para completar el sistema de ecuaciones anterior", [10]. Estas ecuaciones representan a un flujo Newtoniano e incompresible, considerando la viscosidad constante.

A pesar que las ecuaciones de Navier-Stokes se las conoce hace más de 150 años, solo en las últimas décadas ha sido posible encontrar soluciones mediante procesos iterativos, empleando técnicas numéricas tales como dinámica de fluidos computacionales (Computational Fluid Dynamic, CFD).

CAPÍTULO 2

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CAMPO DE VELOCIDADES ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACIÓN.

El presente capítulo tiene como principal objetivo la determinación experimental del flujo alrededor de planos de flotación mediante la técnica de Anemometría Laser Doppler, ("Laser Doppler Anemometry", LDA). Se empieza presentando las Flotaciones seleccionadas en forma tridimensional para una mejor visualización de las mismas, y luego para el estudio experimental se recurren a modelos físicos de los Planos de Flotaciones seleccionados, elaborados a escala. Una vez construidos los modelos físicos se realiza el proceso experimental para la obtención de los campos de velocidad, y finalmente se procede al análisis de las velocidades a diferentes cortes, a la entrada del flujo, en sección media de los modelos y hacia popa, específicamente donde se forma la estela.

2.1 Geometría y Construcción de los modelos.

El análisis del flujo del agua alrededor de buques es difícil de desarrollar y una forma de iniciarse en estos estudios es mediante el análisis bidimensional de los flujos alrededor de planos de flotación. Para desarrollar estos análisis se va a emplear modelos físicos cuyas dimensiones son obtenidas mediante el plano de líneas de formas de un buque Sardinero, "Cavinko I", como se muestra en la figura 8. El buque sardinero seleccionado es de nacionalidad ecuatoriana, y pertenece a la flota de barcos de la Empresa Pesquera Polar S.A. En la figura 7 se muestran fotografías del buque en carenamiento en el año 2007, cuando se realizó el levantamiento del Plano de Líneas de Formas, que se presenta en la figura 8.

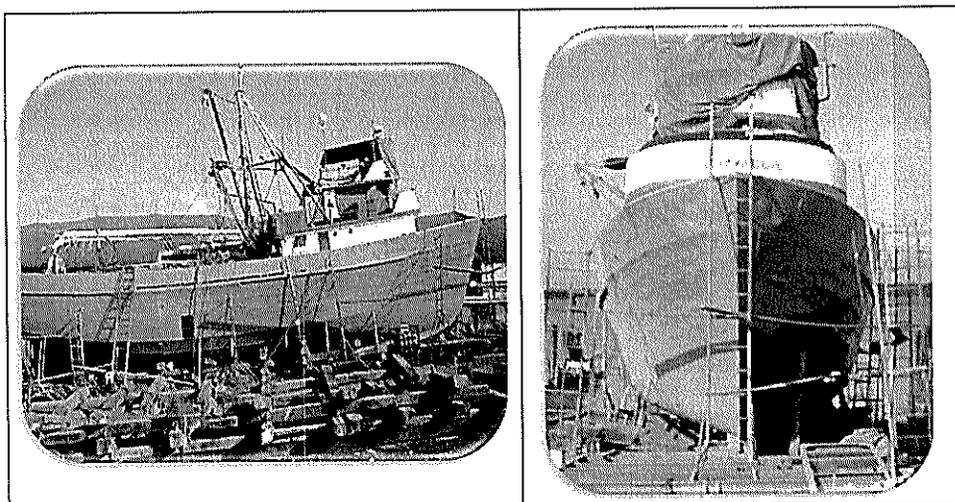


Figura 7. Carenamiento del Buque Sardinero Cavinko I, año 2007.
[Fuente: Elaboración Propia]

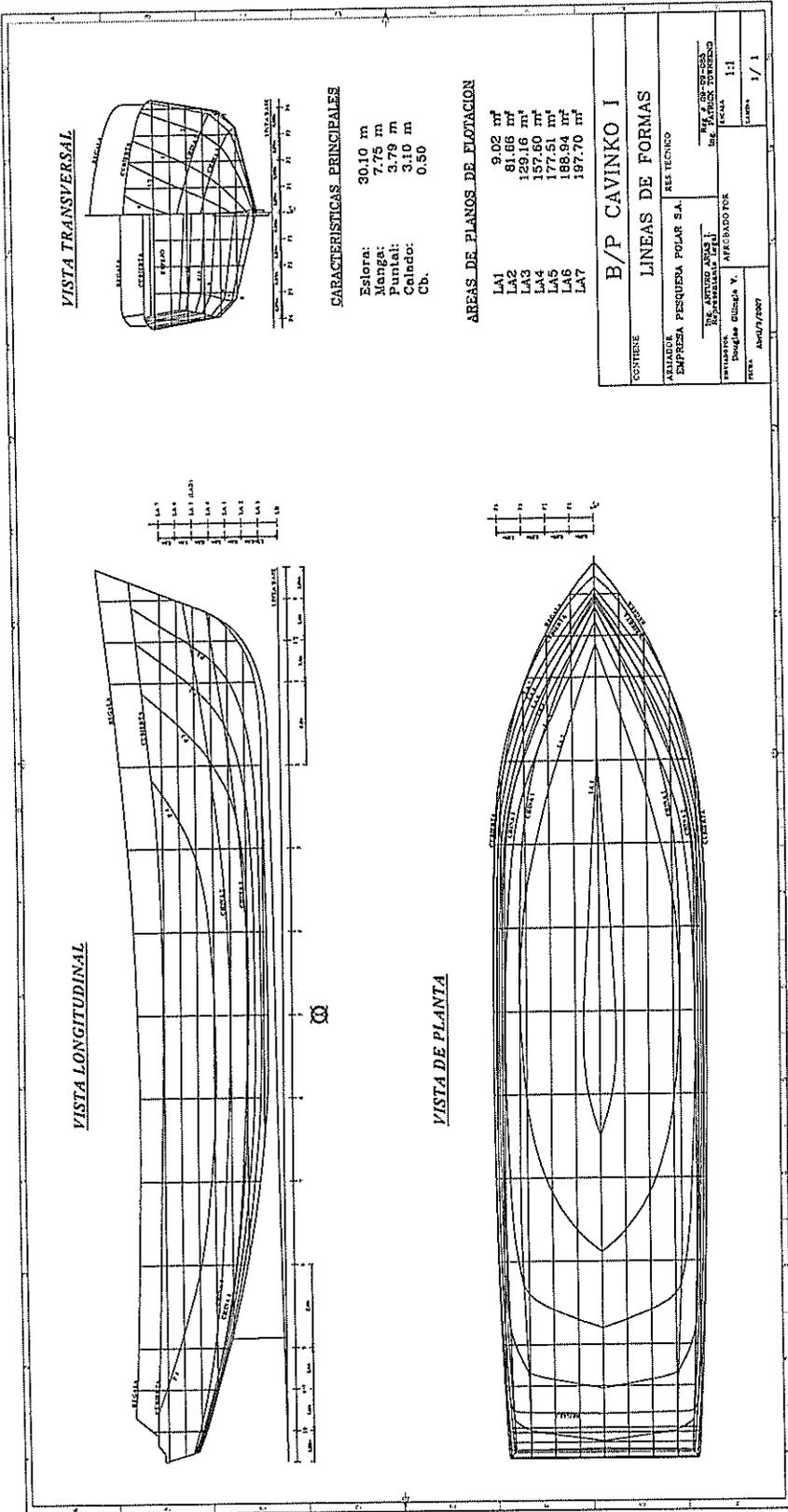
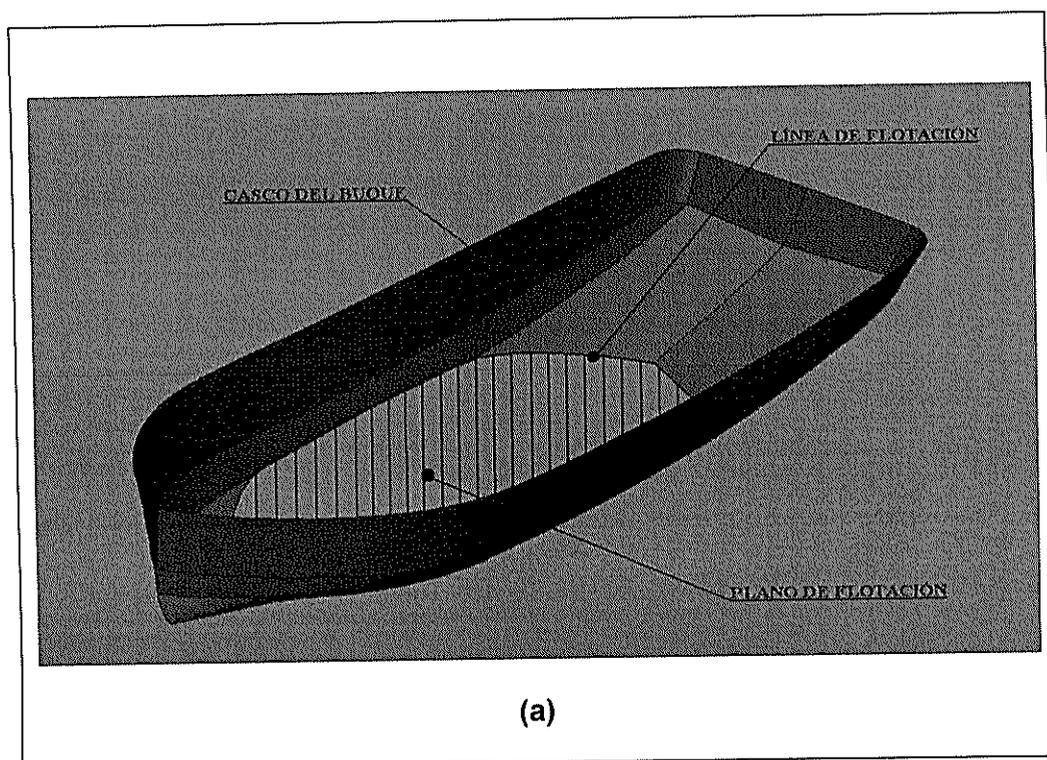


Figura 8. Plano de Líneas de Formas, Cavinko I.
 [Fuente: Elaboración Propia]

Con las dimensiones obtenidas del plano de Líneas de formas se procedió a elaborar una maqueta electrónica del buque, con el fin de seleccionar y visualizar los planos de flotación a analizarse. En la figura 9, se presentan dos diagramas mostrando al buque en 3D y las flotaciones seleccionadas para el análisis experimental del flujo bidimensional, que se forman de la intersección del casco del buque con cada plano horizontal de flotación.



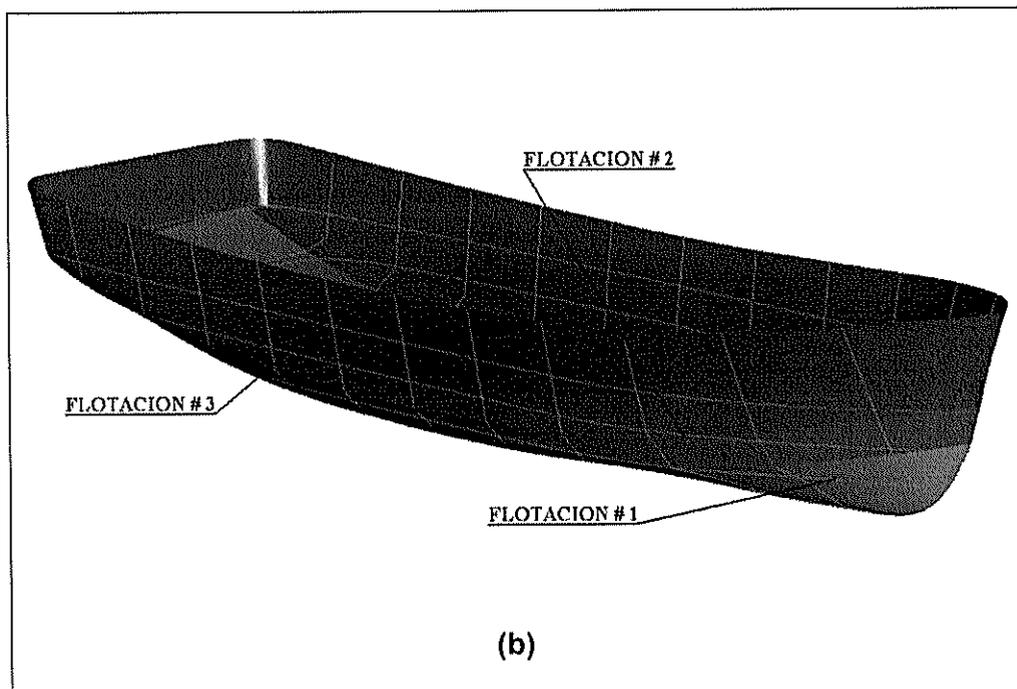


Figura 9. Diagrama Tridimensional del Buque Sardinero Cavinko I.
[Fuente: Elaboración Propia]

Como se muestra en la figura 9(b), se escogieron tres planos de flotación, definidos como **WP3** al de mayor longitud, el intermedio como **WP2** y finalmente al plano más bajo en el casco como **WP1**. Por restricción geométrica del canal de circulación donde se realizaron las pruebas se procedió a aplicar un factor de escala a las dimensiones del buque real, con el fin de ajustar al plano de flotación de mayor eslora a 40 cm de longitud. Las dimensiones para cada modelo resultaron como se muestra en la figura 10. El Plano de Flotación **WP1** no corta a las chinas, mientras que los otros dos si son afectados.

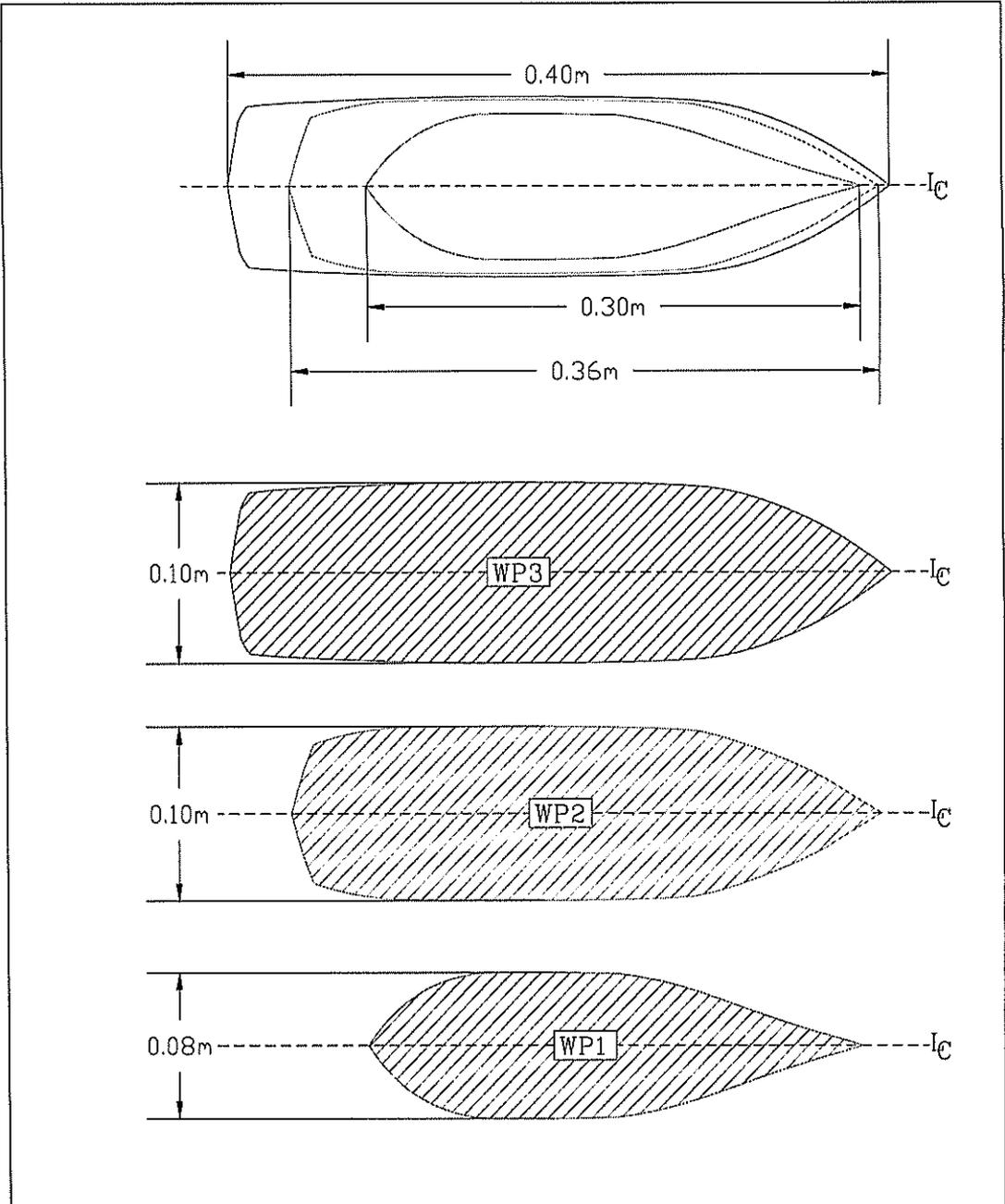


Figura 10. Dimensionamiento a escala para los modelos físicos.
[Fuente: Elaboración Propia]

Con las dimensiones de cada plano de flotación de la figura 10, se prosiguió con la elaboración de los modelos. El material seleccionado para la construcción de los modelos es conocido como Cedro de Castilla. Es un material considerado como una madera de fácil manipulación, es decir, suave para los cortes y fácil para moldearse. En la figura 11 se presentan algunas fotos del proceso de elaboración de los modelos.

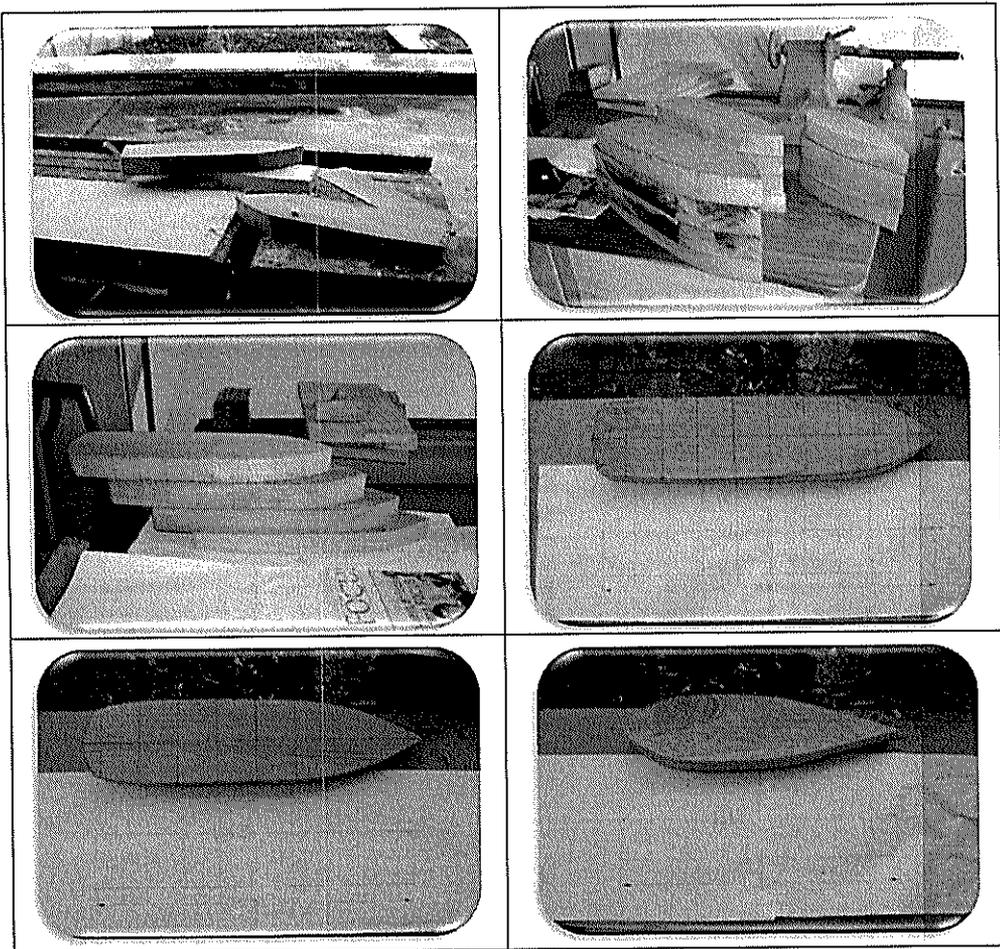


Figura 11. Proceso de elaboración de los modelos físicos.
[Fuente: Elaboración Propia]

Los modelos físicos fueron elaborados con paredes verticales (flotaciones verticales), con una altura de 18 cm cada uno. El interior es hueco con el propósito de poder poner pesos dentro de cada uno de ellos, debido a que el material del que están contruidos es muy ligero. Sin los pesos los modelos serían arrastrados fácilmente por la corriente del agua en el canal de experimentación. A continuación en la figura 12 se muestran los modelos terminados.

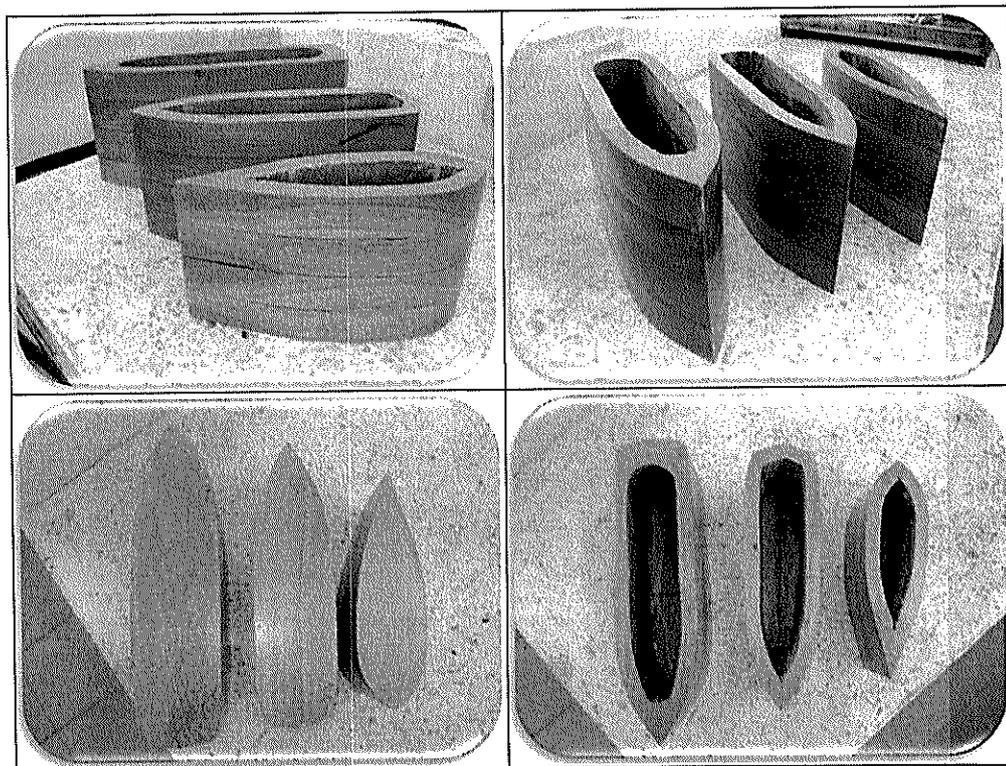


Figura 12. Etapa final de los modelos que representan a los planos de flotaciones escogidos para el análisis Experimental.
[Fuente: Elaboración Propia]

2.2 Proceso Experimental para la obtención de los campos de velocidades.

Para el análisis experimental del campo de velocidades alrededor de los planos de flotación especificados anteriormente, se utilizó la técnica LDA "Laser Doppler Anemometry". Esta técnica mejora la precisión de los resultados obtenidos debido a que es un sistema no intrusivo, es decir no existe algún elemento físico que se deba introducir en el flujo para medir la velocidad en cada punto específico. Los modelos se colocaron en un canal de circulación de 60 cm de ancho como se muestra en la figura 13 y que es parte del laboratorio de Ing. Naval de la FIMCM. En el Apéndice A se especifica en detalle la función de cada componente que integra todo el sistema.

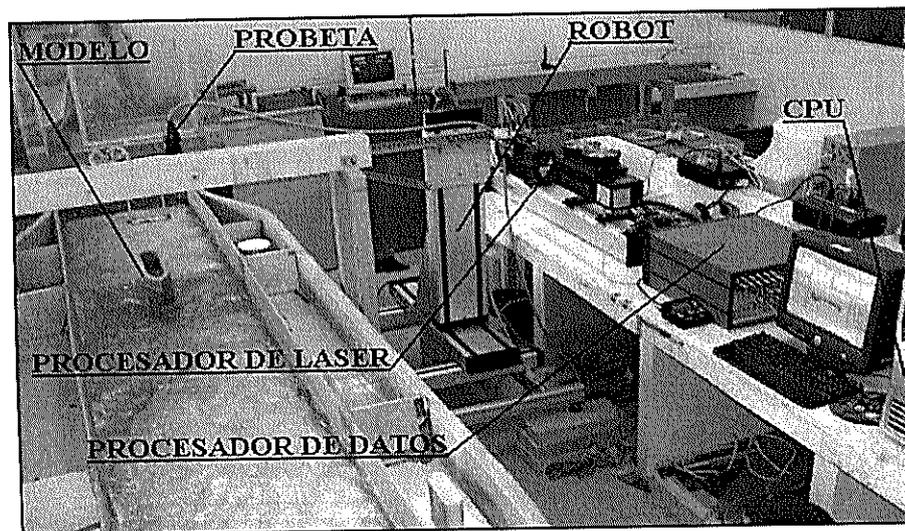


Figura 13. Sistema LDA acoplado al canal de experimentación.
[Fuente: Elaboración Propia]

Como se puede apreciar en la figura 14, la intersección de los rayos laser que salen de la probeta, corresponde al punto de medición de la velocidad en el flujo. Nótese que la distancia que hay entre el fondo del canal y la intersección de los laser es de 4.5 cm aproximadamente; hay que tener en cuenta que la distancia entre la salida de los laser de la probeta y la intersección siempre es de 40 cm, lo cual es una característica del equipo. Se consideró que la distancia de 4.5 cm es adecuada para mantenerse suficientemente encima del fondo y debajo de la superficie libre para evitar excesivas reflexiones. En la figura 15 se observa un corte transversal del canal de experimentación mostrando las distancias anteriormente mencionadas.

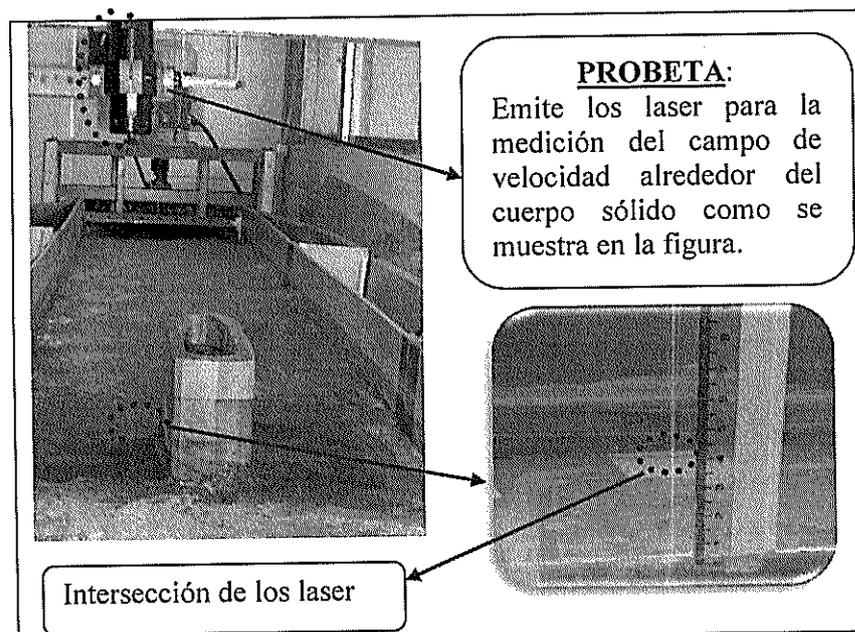


Figura 14. Función de la probeta del sistema LDA.
[Fuente: Elaboración Propia]

El sistema incluye un dispositivo, robot, para desplazar la probeta hacia las posiciones donde se desea realizar las mediciones.

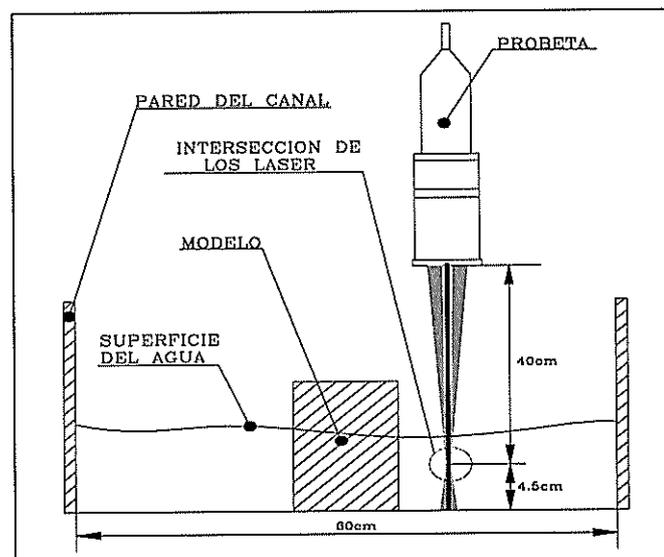


Figura 15. Esquema del sistema de medición utilizando la técnica LDA.
[Fuente: Elaboración Propia]

El primer paso para el análisis experimental es la selección de las posiciones de medición alrededor de los planos seleccionados donde se realizarán las mediciones. Por esto se elabora una malla en donde las coordenadas de cada punto de intersección son almacenadas en una tabla de puntos en un archivo con extensión Txt. La malla se elaboró utilizando la herramienta computacional de graficación Auto CAD. En la figura 16 se puede apreciar el mallado y las dimensiones de las cuadrículas para cada plano de flotación. El número de puntos contenidos en las mallas de los planos WP3, WP2 Y WP1 son 1551, 1669, 1812 respectivamente.

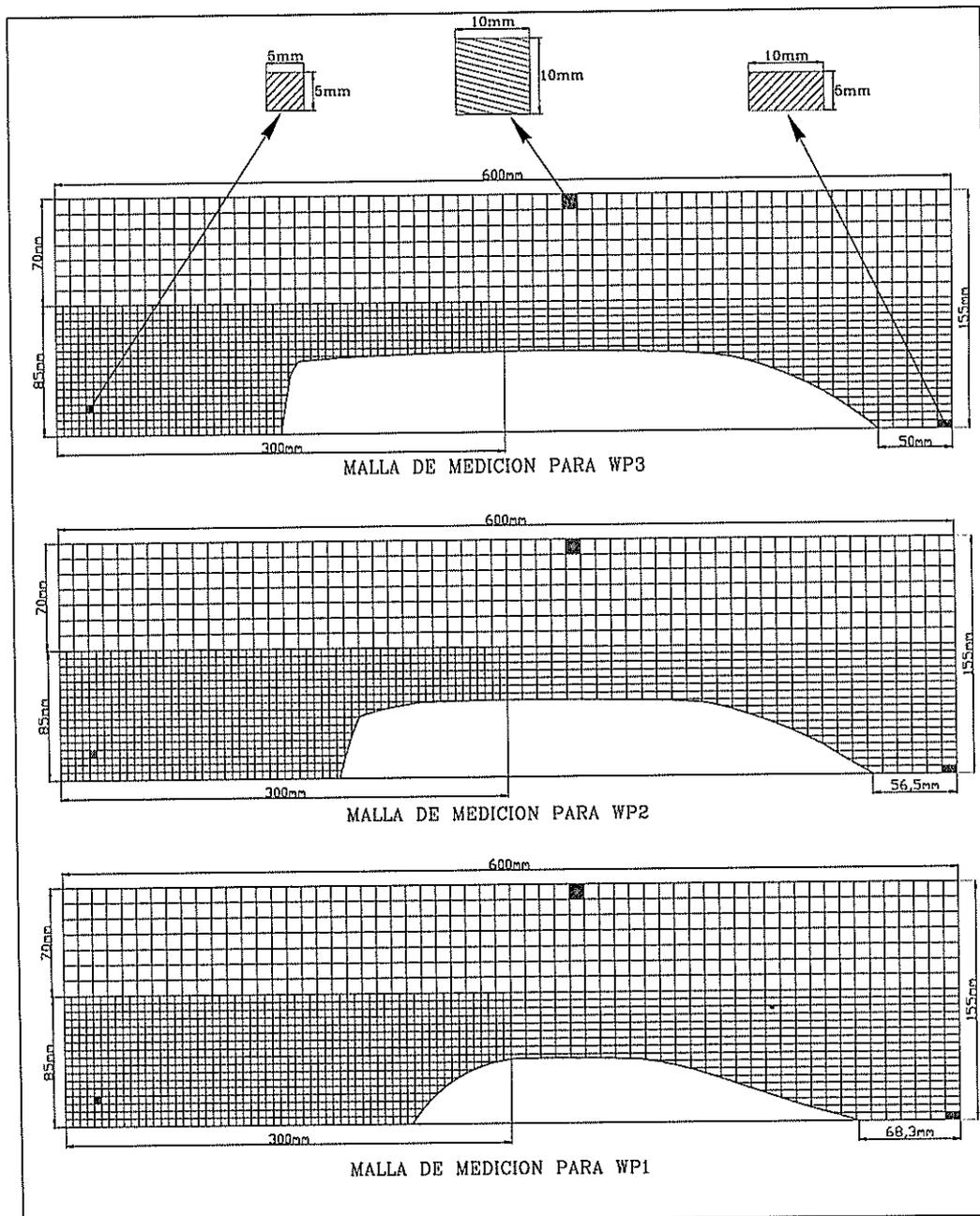


Figura 16. Malla y Tamaño de cuadrícula para cada Planos de Flotación.
[Fuente: Elaboración Propia]

Nótese que las dimensiones de las cuadrículas varían en diferentes sectores. Se consideró reducir las dimensiones de las cuadrículas en la sección posterior de los planos es decir a Popa de cada flotación, debido a que en esa zona se espera la generación de vórtices.

En la figura 16 las medidas de las cuadrículas están en milímetros, para poder importarlos directamente al software que permitirá que el robot que sujeta a la probeta siga automáticamente las coordenadas dadas, con el fin de obtener las velocidades en cada punto de la malla. Otro factor importante en este proceso es el punto de origen para la obtención de las coordenadas de la malla, y el direccionamiento del robot, como se muestra en la figura 17. Además dada la dirección "x", si el flujo es de derecha a izquierda, los valores registrados en flujo libre serán principalmente negativos.

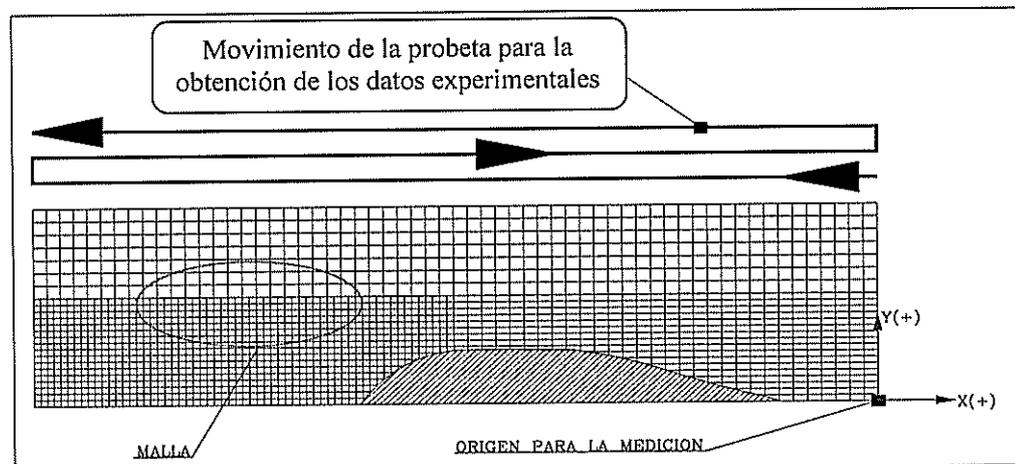


Figura 17. Origen y dirección del movimiento de la probeta para la obtención de los datos. [Fuente: Elaboración Propia]

El software BSA Flow en su versión 4.10 [11], permite la automatización del robot y el procesamiento de los datos tomados en cada punto de la malla, permitiendo la observación de los vectores de velocidad del flujo alrededor de cuerpos sólidos. Este software es parte del paquete de instrumentación experimental que utiliza la técnica LDA elaborado por la compañía Dantec Dynamics.

Con los pasos descritos anteriormente se procede a la obtención de los resultados experimentales. En este caso durante las pruebas se obtuvieron algunos parámetros de importancia para cada modelo, como se puede apreciar en las tablas II a V.

Nomenclatura	Descripción	Unidad
wp3:	Plano de flotación 3	-----
wp2:	Plano de flotación 2	-----
wp1:	Plano de flotación 1	-----
v:	Velocidad del Flujo	m/s
h:	Altura promedio del nivel del agua en el tanque	cm
t	Tiempo de duración de la Prueba	horas
T:	Temperatura del Agua	°C

Tabla II. Descripción de los parámetros obtenidos en las pruebas experimentales. [Fuente: Elaboración Propia]

Fecha	v	vb	h	t	T
11/03/2009	0.6	35	10	4.33	25
16/03/2009	0.4	27	9	4.35	25
24/03/2009	0.2	24.5	8.5	4.45	26
31/03/2009	0.04	22.5	8.5	4.52	28

Tabla III. Parámetros Experimentales para WP3.
[Fuente: Elaboración Propia]

Fecha	v	vb	h	t	T
13/03/2009	0.6	35	10	4.43	25
19/03/2009	0.4	27	9	4.57	25
26/03/2009	0.2	24.5	8.5	4.53	26
07/04/2009	0.04	22.5	8.5	4.35	28

Tabla IV. Parámetros Experimentales para WP2.
[Fuente: Elaboración Propia]

Fecha	v	vb	h	t	T
12/03/2009	0.6	35	10	4.46	25
20/03/2009	0.4	27	9	4.35	26
27/03/2009	0.2	24.5	8.5	4.32	26
10/04/2009	0.04	22.5	8.5	4.35	27

Tabla V. Parámetros Experimentales para WP1.
[Fuente: Elaboración Propia]

En las tablas III a V se presenta el parámetro "vb", que es mostrado en la pantalla del regulador de velocidad de la bomba, en el canal de experimentación; con estos valores para cada prueba se aseguran las velocidades de entrada seleccionadas del flujo libre "v" alrededor de los modelos.

En promedio las pruebas duran entre 3 y 5 horas aproximadamente, con un tiempo de medición en un punto de 3 segundos; sin embargo este tiempo no necesariamente es el que tarda para la obtención de las velocidades en el flujo. Debido a un parámetro adicional que posee el sistema LDA denominado Validación (ver Apéndice A), el tiempo de adquisición de datos puede tardar unos segundos más, hasta que dicho parámetro sea por lo menos del 50 %. Cuando los rayos Laser se interceptan sobre la superficie sólida del modelo, ó, cuando hay señal defectuosa, la validación es baja y luego de un cierto tiempo el sistema se desplaza hacia el siguiente punto de medición, sin haber obtenido valor alguno. A continuación se presenta en forma tabulada la velocidad de flujo libre, la Viscosidad Cinemática y el número de Reynolds para cada prueba de cada modelo. La longitud del modelo fue seleccionada como el doble del ancho original del canal (80 cm), el que tuvo que ser luego reducido para mejorar la uniformidad del flujo.

MODELO	V [m/s]	ν [m ² /s]	Re	Nombre de Archivo
WP3	0,6	8,9E-07	2,7E+05	wp3_06.dat
	0,4	8,9E-07	1,8E+05	wp3_04.dat
	0,2	8,7E-07	9,2E+04	wp3_02.dat
	0,04	8,4E-07	1,9E+04	wp3_004.dat
WP2	0,6	8,93E-07	2,42E+05	wp2_06.dat
	0,4	8,93E-07	1,61E+05	wp2_04.dat
	0,2	8,73E-07	8,25E+04	wp2_02.dat
	0,04	8,36E-07	1,72E+04	wp2_004.dat
WP1	0,6	8,93E-07	2,02E+05	wp1_06.dat
	0,4	8,73E-07	1,37E+05	wp1_04.dat
	0,2	8,73E-07	6,87E+04	wp1_02.dat
	0,04	8,54E-07	1,41E+04	wp1_004.dat

Tabla VI. Números de Reynolds para cada prueba.
[Fuente: Elaboración Propia]

2.3 Análisis del campo de velocidad de cada plano de flotación.

Los campos de velocidad para cada plano de flotación se presentan en el Apéndice B, utilizando los valores medios. Para analizar la influencia de cada modelo en los campos de velocidad, se resumieron los valores en dirección "x" medidos en diferentes posiciones longitudinales. En la figura 18 se muestran los cortes realizados al inicio ($x=0.0$), en la zona central, y, a $5\%L$ a Popa del "espejo" para el plano de flotación 3. En las siguientes figuras 19 al 21 se muestran los valores medios de la componente x de la velocidad, en los cortes anteriormente mencionados. En dichas figuras se incluyeron curvas de tendencia, Polinomios de orden 4; para el corte $x=0$, en el origen, se empleó una función lineal.

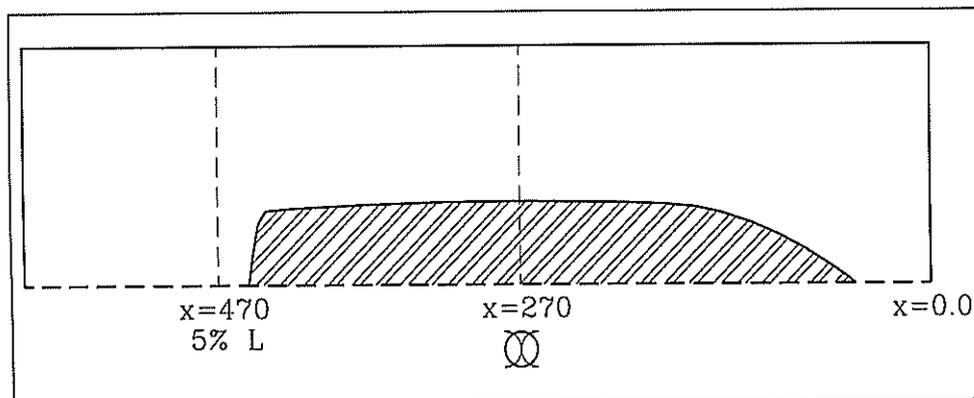
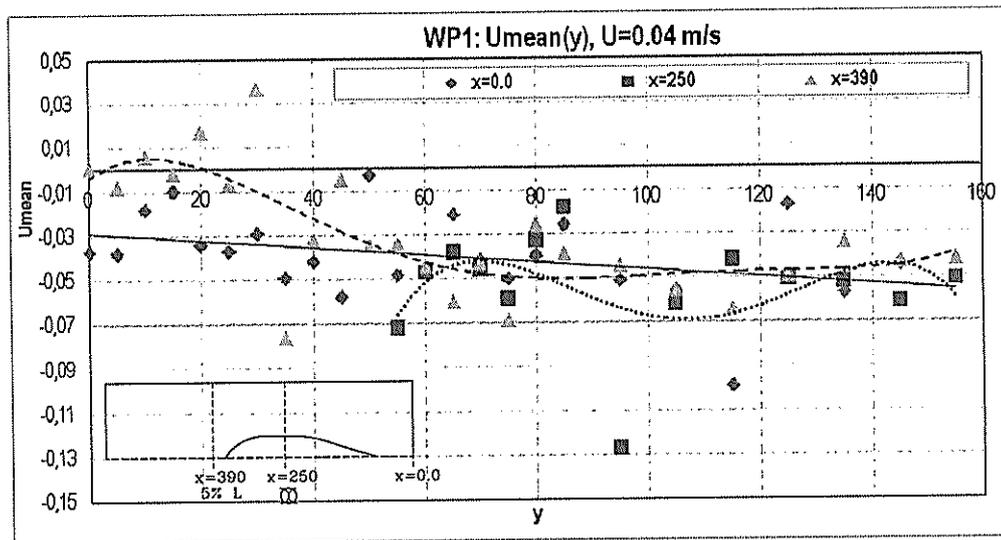


Figura 18. Cortes a diferente posición longitudinal para el análisis de la influencia del campo de velocidad para el plano de flotación 3.

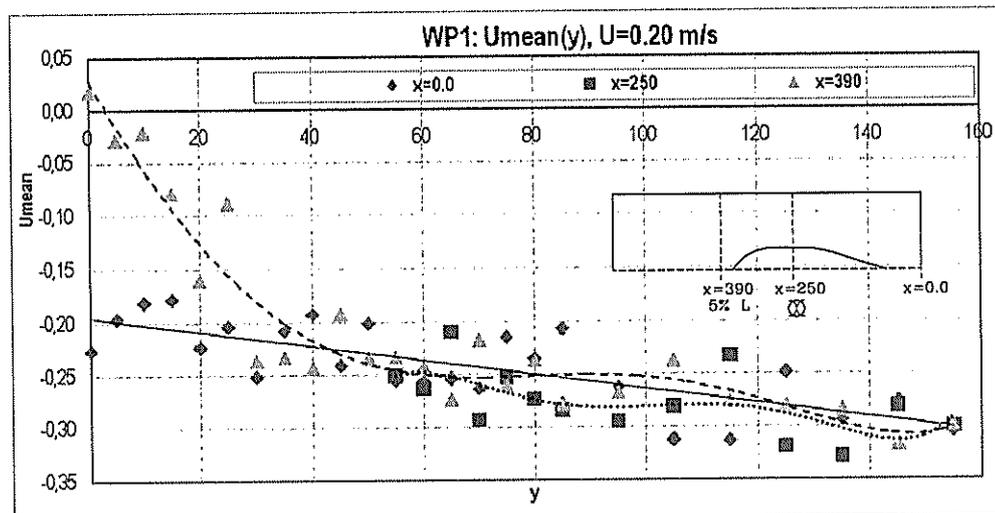
[Fuente: Elaboración Propia]

Para el análisis en los cortes "x" en la estela de los modelos, se utilizará el término Contra flujo, que describe el cambio de la dirección de la velocidad con respecto al flujo de entrada en $x=0.0$, es decir flujo invertido.

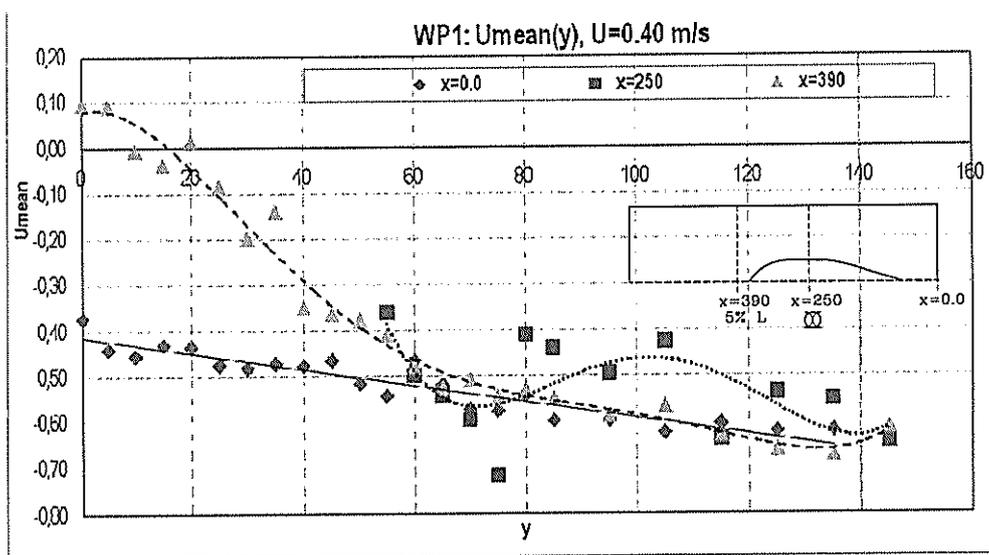
Figura 19. Velocidades medias x en tres cortes para el Plano de Flotación 1.
[Fuente: Elaboración Propia]



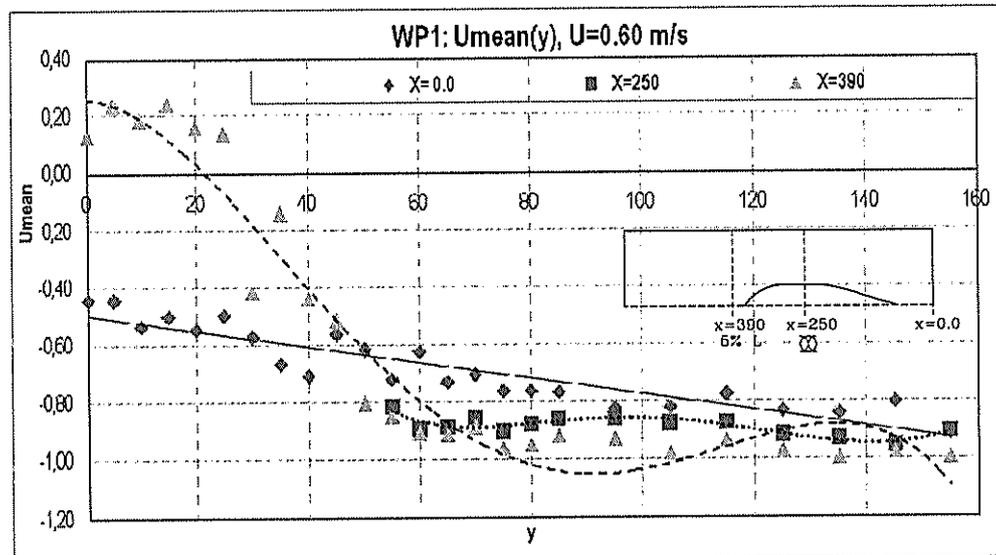
(a)



(b)



(c)



(d)

En las gráficas a, b, c y d de la figura 19 se puede apreciar que la velocidad del flujo libre en $x=0.0$ no tiene un comportamiento uniforme, sino que tienden a incrementarse en la dirección "y" esto es a lo largo de la semimanga de los modelos.

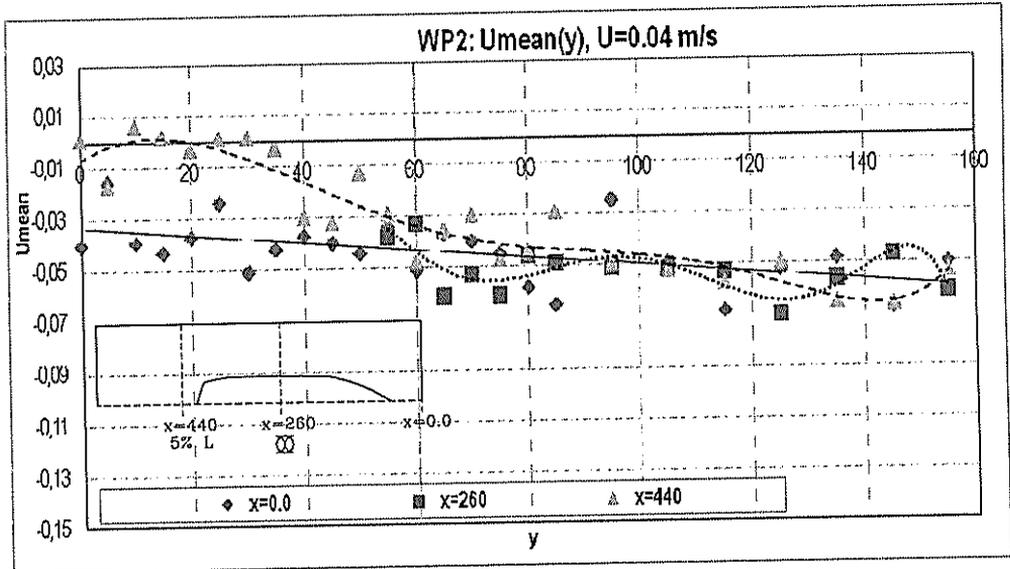
A medida que se incrementa la velocidad en el modelo, se observa que el contra flujo se incrementa a lo largo de "y", este fenómeno es el que se esperaba debido a que la formación de vórtices se incrementa con la velocidad. La mayor velocidad de flujo invertido se observa a 0.60 m/s de velocidad de entrada en un punto de la crujía con un valor de 0.25 m/s.

Si consideramos la estela como la región donde se observa una reducción en velocidad, el ancho de dicha zona es influenciada por la velocidad. Para las velocidades de 0.04 y 0.2 m/seg, el limite de la reducción de la velocidad ocurre aproximadamente desde $y = 60\text{mm}$ hacia crujía, mientras que para las velocidades de 0.6 y 0.4 m/seg ocurre alrededor de $y = 70\text{ mm}$ hacia crujía. Nótese además para el corte a $x=390\text{ mm}$ el ancho máximo del contra flujo ocurre en $y = 23\text{ mm}$ como se observa en la figura 19 (d).

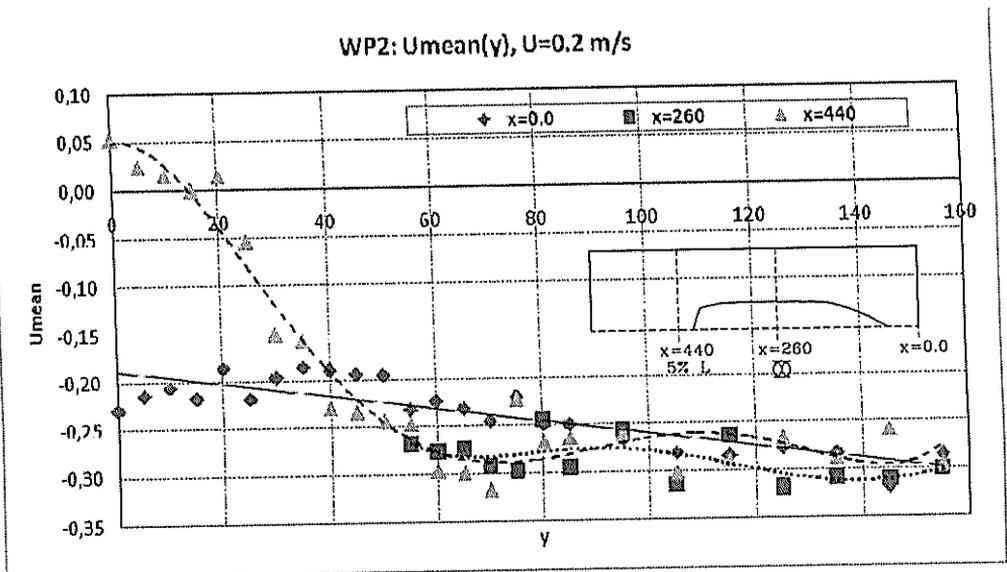
En Sección media del modelo se puede notar que existe un incremento de la velocidad a lo largo de las ordenadas. Únicamente a la velocidad de 0.4 m/s

se observa disminución de velocidad a partir de $y = 80$ mm, alejándose del cuerpo.

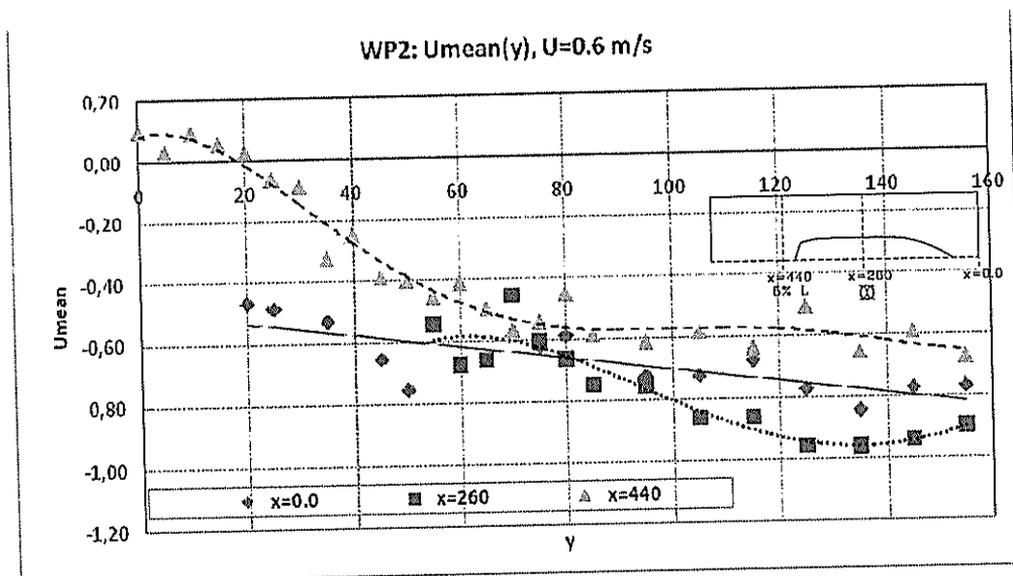
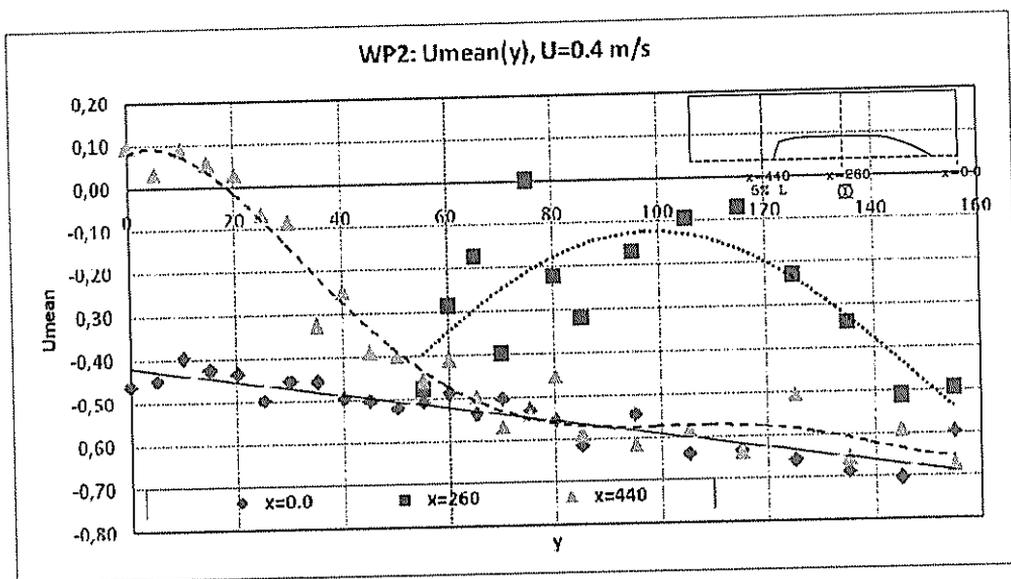
Figura 20. Velocidades medias x en tres cortes para el Plano de Flotación 2.
[Fuente: Elaboración Propia]



(a)



(b)



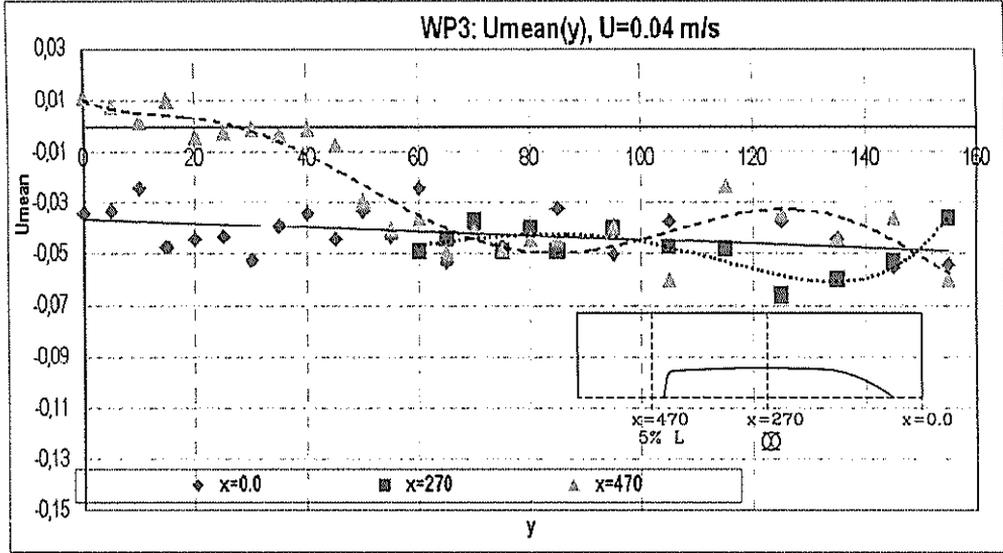
Las velocidades del flujo libre en $x = 0.0$ mm, de la misma forma que ocurrió con el plano de flotación 1, no tienen un comportamiento uniforme y se incrementa en dirección de la semimanga de los modelos.

En las graficas (a) hasta (d) de la figura 20 muestran los datos obtenidos para el plano de flotación 2. Se puede observar que a medida que se incrementa la velocidad del flujo libre, el contra flujo se presenta aproximadamente desde $y = 20$ mm para el corte en $x = 260$ mm. De la geometría del modelo se sabe que la semimanga es de 50 mm, esto implica que el ancho del contra flujo es 40 % $B/2$ en el corte a 5%L para este caso.

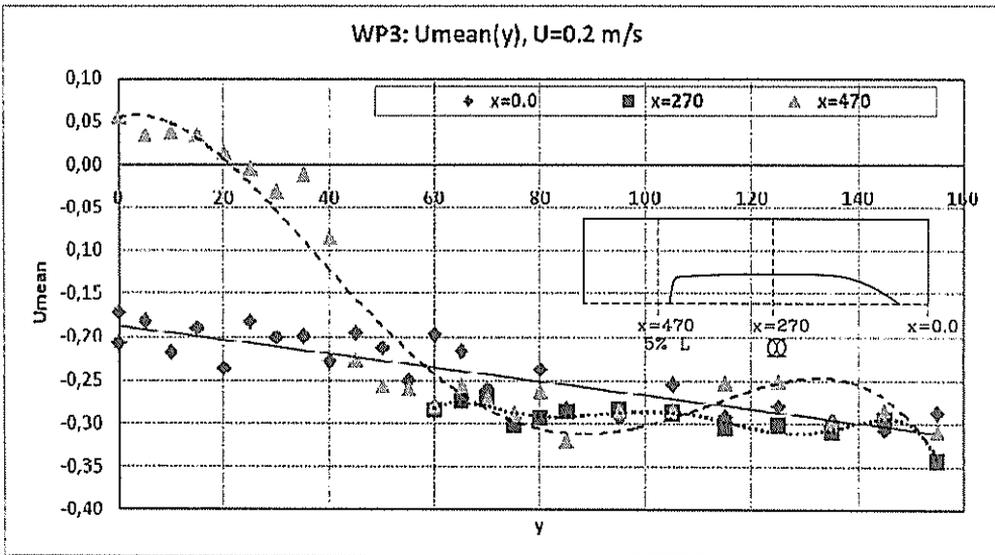
En Sección Media se puede apreciar que existe disminución de la velocidad respecto a la velocidad del flujo libre en el sentido de las "y", esto ocurre cuando la velocidad del flujo de entrada es de 0.4 m/s. Solo en este caso se obtuvieron estos resultados; nótese que para las demás velocidades se observa un aumento en la velocidad.

En la gráfica (d) y (c) de la figura 20, para el corte a $x=440$ mm, se observa una disminución total de la velocidad en sentido de las ordenadas respecto a la velocidad del flujo libre en $x=0.0$, solo en 20(c) se puede observar un aumento de la velocidad en ciertos puntos dentro del rango de 60 a 80 mm en sentido de la semimanga del modelo. Esto implica que al incrementar la velocidad del flujo libre de entrada se tienen disminución total de la velocidad en el corte a 5%L.

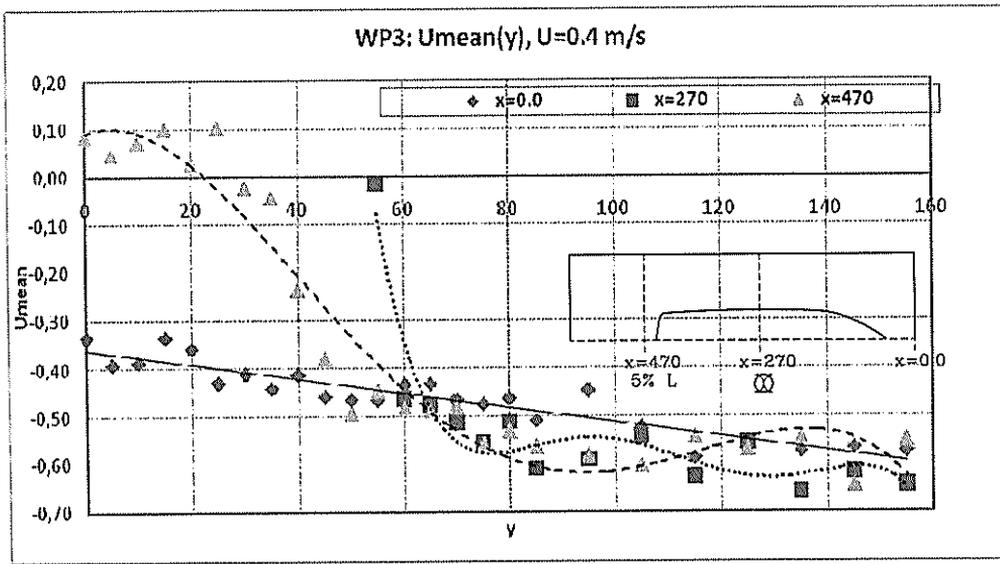
Figura 21. Velocidades medias x en tres cortes para el Plano de Flotación 3
 [Fuente: Elaboración Propia]



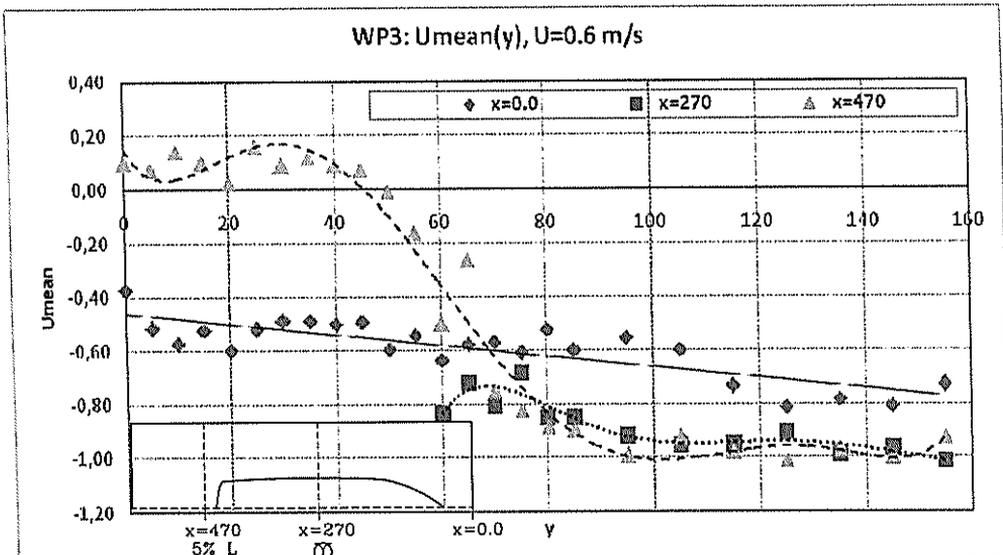
(a)



(b)



(c)



(d)

Como en los demás pruebas, la velocidad del flujo libre en $x=0.0$, no se presenta uniforme, y se incrementa con "y". Se puede observar que cuando la velocidad de entrada es de 0.04 m/seg, existe mayor dispersión de las velocidades en $x = 0.0$, mientras que para las demás velocidades analizadas la dispersión disminuye respecto la línea de tendencia de cada prueba.

En la gráfica (d) de la figura 21, para el corte a $x= 470$ se observa que el ancho del contra flujo tiene el mismo valor que la semimanga del modelo, que para este caso es de 50 mm. Nótese además que para las demás graficas se observa que la máxima amplitud del contra flujo es el 25 % de la velocidad de entrada del flujo libre, por ejemplo para la velocidad de 0.04 m/seg en la figura 21 (a) la máxima velocidad del contra flujo es de 0.01 m/seg.

En Sección Media del modelo los datos observados indican que existe un incremento total de la velocidad conforme se aleja de la superficie solidad del cuerpo. En la figura 21(c) se puede observar un valor cercano al cuerpo con velocidad aproximadamente cero y luego los demás valores en sentido de la "y" se incrementan en $x=270$ mm.

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN NUMÉRICA DEL CAMPO DE VELOCIDADES ALREDEDOR DE PLANOS DE FLOTACIÓN.

En el capítulo anterior se presentó el análisis experimental de los flujos bidimensionales alrededor de planos de flotación de un buque. Este capítulo tiene como principal objetivo la simulación numérica de dichos flujos. Se va a aplicar una herramienta de la Dinámica de Fluidos Computacionales, conocida comúnmente como CFD por sus siglas en inglés, "Computational Fluid Dynamics". Para la simulación numérica se utilizará el paquete computacional COMSOL MULTIPHYSICS en su versión 3.4; este software resuelve sistemas de ecuaciones en Derivadas Parciales (PDEs), y emplea el método de Elementos Finitos para la discretización espacial del sistema. Finalmente se procede al análisis de los campos de velocidad del fluido en cortes, realizados a la entrada del flujo, en Sección Media, y, a 5%L hacia Popa de cada modelo.

3.1 Partición del Dominio para la Modelización Numérica.

Para comenzar con la solución numérica se debe seleccionar el tipo de modelo numérico a emplearse dentro del programa, y la generación de las geometrías de los planos de flotación y sus entornos, y, luego se describe la partición del dominio en general. A continuación se describe el tipo de modelo y las geometrías utilizadas para la presente simulación.

Selección del Modelo Numérico:

Esta etapa implica escoger el tipo de modelo que se utilizará para la simulación numérica. Se define primero el número de dimensiones del problema, que para este caso es bidimensional (2D), además se selecciona el tipo de fenómeno físico a resolverse, y, finalmente las ecuaciones de gobierno del sistema. A continuación se presenta en la Tabla VII las características del modelo a emplearse para el presente análisis. Análisis

CARACTERÍSTICA DEL MODELO	DIMENSIÓN DEL MODELO	(2D)
	FENÓMENO FÍSICO	DINAMICA DE FLUIDOS (FLUID DYNAMICS)
	ECUACIONES DE GOBIERNO	IMCOMPRESIBLE NAVIER-STOKES
	TIPO DE ANÁLISIS	ANÁLISIS TRANSIENTE (TRANSIENT ANALYSIS)

Tabla VII. Características del modelo para la simulación numérica [12].

Definición de la geometría:

Para este análisis las dimensiones escogidas para el proceso de la simulación numérica para cada plano de flotación son las mismas que en el capítulo anterior, con el objetivo de poder comparar los resultados Numéricos-Experimentales de las mismas geometrías. Por lo tanto las geometrías finales utilizadas en la simulación se muestran en la figura 22.

Para generar las geometrías de los planos de flotación y sus contornos se recurrió a las herramientas de graficación AutoCAD. Luego, una vez finalizadas dichas geometrías, se procede a la importación del archivo que contiene cada plano de manera individual al programa de simulación numérica mediante un archivo con extensión DXF.

La importación mencionada desde COMSOL se realiza dentro del programa, con el comando FILE/IMPORT/CAD DATA FROM FILE. Cuando se seleccione el archivo DXF, en el cuadro de diálogo se observa "Options..."; este ícono es seleccionado y se escoge la opción "Do not kint", que permite importar geometrías con superficie curvas, de lo contrario mediante la importación el programa asume las secciones como rectas. Para geometrías cuya superficie está formada por varias curvas, tal como es el caso de los planos de flotación a analizarse, se debe seleccionar la opción anteriormente mencionada.

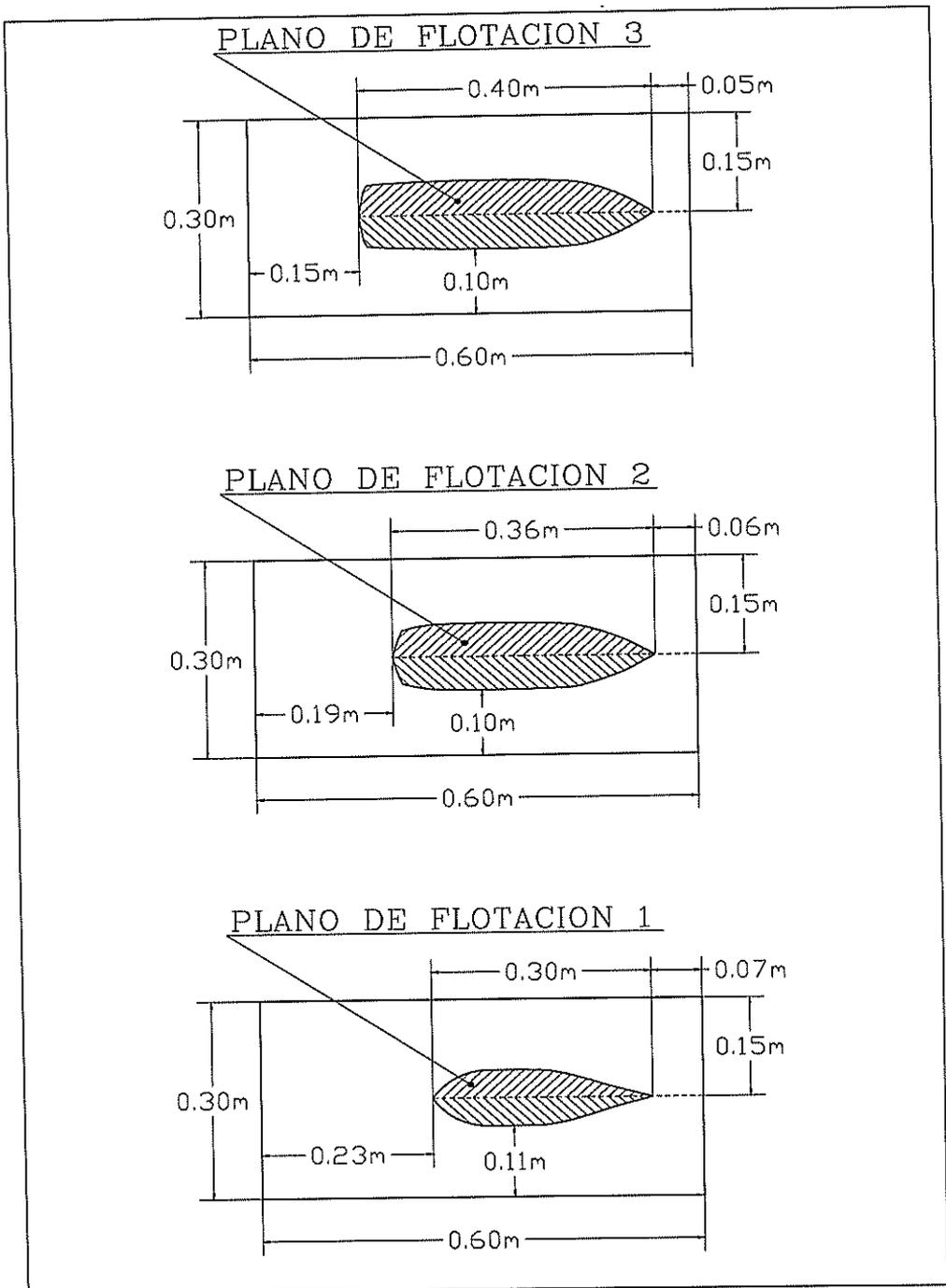
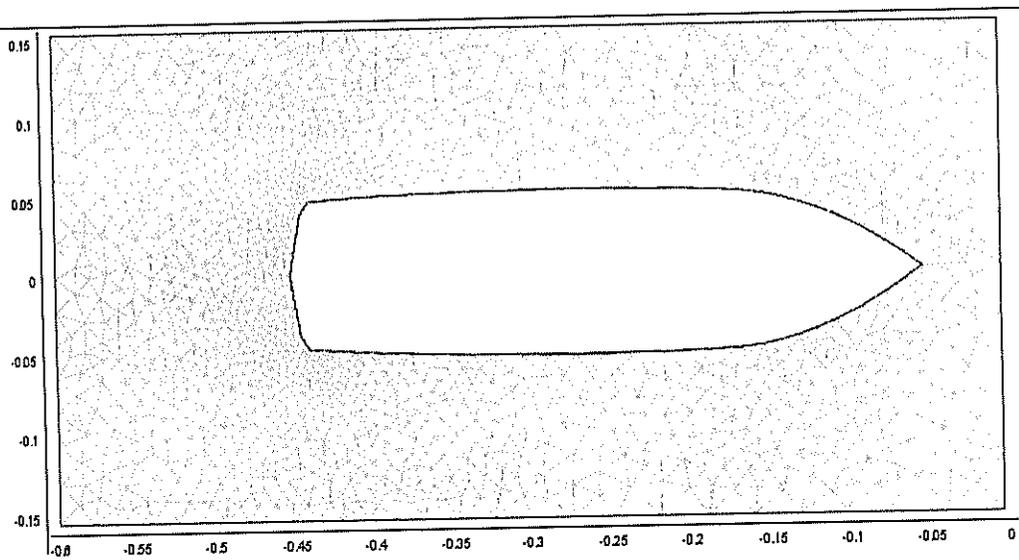


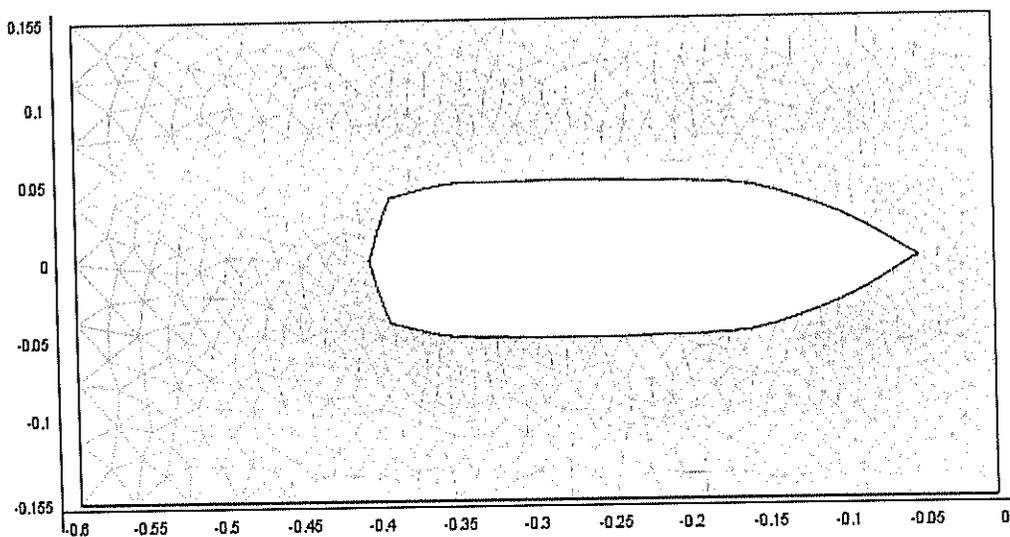
Figura 22. Geometría de los planos de flotación para la Simulación Numérica. [Fuente: Elaboración Propia]

Una vez seleccionado el modelo a utilizarse y definidas las geometrías, se procede a la partición del dominio, que consiste en la discretización del lugar geométrico o dominio, el cual se subdivide en pequeños elementos definidos por un número de puntos, que a su vez forman una malla en el dominio. Los puntos son denominados Nodos y en cada uno de los elementos se aproximan expresiones algebraicas que ayudan a resolver las ecuaciones diferenciales parciales, teniendo el valor de las funciones incógnitas tales como velocidad y presión.

La técnica de particionar el dominio o dividir el espacio se lo conoce como el mallado del sistema ("meshing"). En cada elemento de la malla se le asigna una ecuación característica que describen las propiedades físicas, condiciones de contorno y de fuerzas impuestas, las cuales se resuelven simultáneamente con el método numérico de tipo Newton [14]. Los elementos utilizados en la presente modelización son de tipo triangular, y se escogió el más sencillo de los elementos triangulares conocido como CSTR (Constant Strain Triangle) de orden 1; este elemento es definido por tres nodos, proporcionando una aproximación lineal para las velocidades, siendo por tanto en su interior la variación constante. En la figura 23 se puede apreciar el mallado resultante para cada plano de flotación a simular.



(a) Malla para el Plano de Flotación 3



(b) Malla para el Plano de Flotación 2

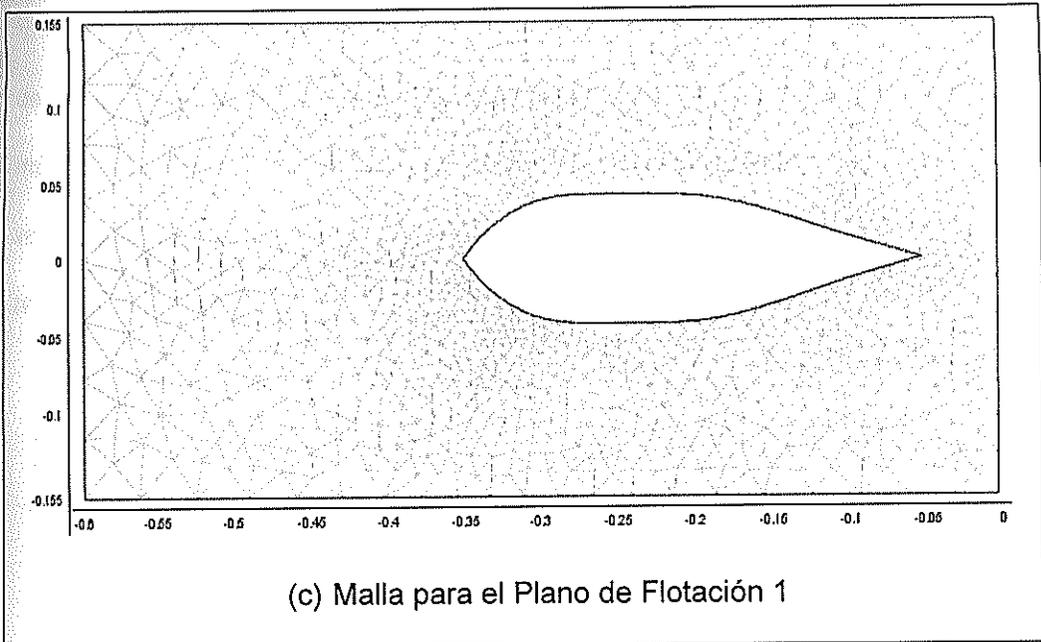


Figura 23. Malla de los Plano de Flotación para la Simulación Numérica.
[Fuente: Elaboración Propia]

Como se puede observar en la figura 23 cada plano de flotación tiene diferente configuración de malla, cambiando la cantidad de elementos triangulares y números de nodos. Esto se debe a que los planos difieren principalmente en sus dimensiones en forma general. En la figura 23 (a), se aprecia la agrupación de los elementos triangulares afinándose en las esquinas de la superficie, por donde pasan las chinas. La agrupación de los elementos triangulares en este tipo de mallado depende de la geometría de las superficies sólidas a simularse y de ciertos parámetros como la determinación del tamaño y la distribución global del elemento.

En la tabla VIII se presentan las características de la malla para cada plano de flotación a ser utilizado en la simulación. Cabe recordar que mientras más fina es la malla, el número de nodos tiende a incrementarse, lo que a su vez implica un aumento del tiempo de ejecución para la convergencia de los resultados numéricos.

Parámetros	Plano de flotación 3	Plano de flotación 2	Plano de flotación 1
Número de grados de libertad	13658	8442	10882
Número de puntos en la malla	1552	964	1236
Número de elementos triangulares	2949	1811	2351
Número de elementos de contorno	155	117	121

Tabla VIII. Configuración de las mallas para los planos de flotación.
[Fuente: Elaboración Propia]

Del análisis experimental realizado en el capítulo anterior, se tomaron lecturas de la temperatura en cada prueba con los modelos físicos (velocidades de 0.6, 0.4, 0.2, 0.04 m/seg), para poder determinar la viscosidad dinámica en las pruebas. En el proceso numérico, a través de la temperatura se van a describir las propiedades del fluido para la simulación.

3.2 Detalles del proceso de Modelización Numérica.

En general la simulación de un proceso de flujo viscoso consta de etapas a seguir, como se muestra a continuación:

- Definición de condiciones iniciales y de contorno,
- Simulación del sistema, y,
- Visualización de los resultados obtenidos mediante la simulación numérica.

Los resultados de cada una de las etapas mencionadas en el proceso de modelización numérica son descritas en detalle y aplicadas directamente a la simulación de los planos de flotación del buque sardinero "Cavinko I". La última etapa que se refiere a la visualización de los resultados, se verá en detalle en el siguiente subcapítulo, y los campos de velocidades obtenidos en cada prueba se los puede observar en el Apéndice C.

Definición de condiciones Iniciales y de contorno:

Este es uno de los pasos más importantes en la simulación numérica, debido que aseguran la Unicidad y Existencia de la solución del problema con valores en la frontera, y en los procesos numéricos aseguran la convergencia de la solución. En la figura 24 se puede observar las

condiciones de contorno a emplearse en los límites de los planos de flotación y de las fronteras que limitan el dominio del sistema.

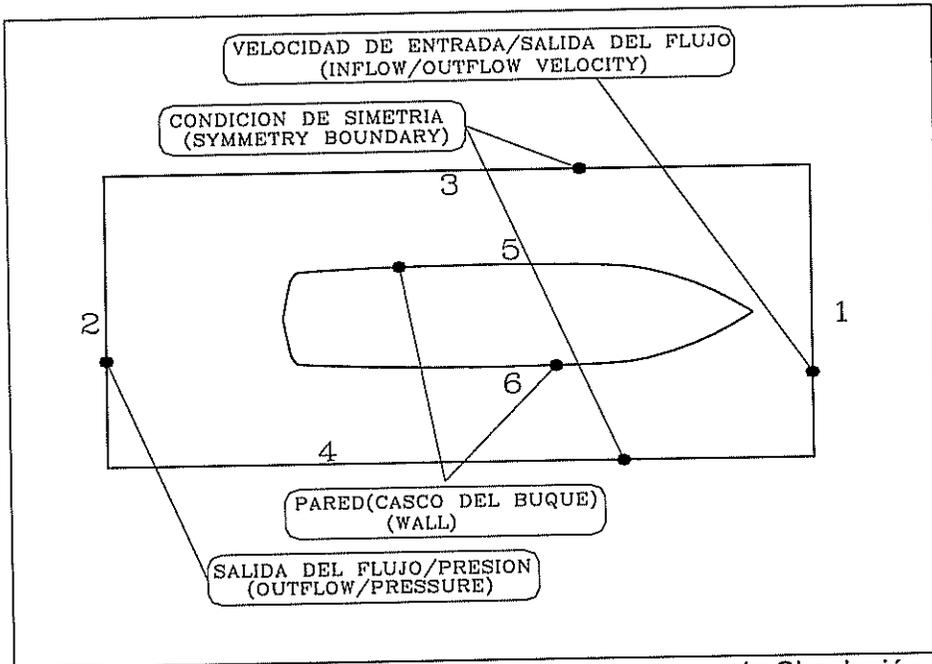


Figura 24. Esquema de las condiciones de contorno para la Simulación Numérica. [Fuente: Elaboración Propia]

Como se puede apreciar en la figura 24, en las fronteras superior e inferior se impuso condiciones de contorno 3 y 4 que representan simetría del flujo, dado que el dominio analizado tenía menor ancho que el del tanque de pruebas. Las condiciones de contorno 5 y 6 representan las paredes del casco del buque, y, finalmente las condiciones 1 y 2 representan la entrada y la salida del flujo en el canal. En la tabla IX se muestran las ecuaciones asignadas a cada condición de contorno y su uso en este proceso.

CONTORNO	CONDICION DE CONTORNO	ECUACION	USO
1	VELOCIDAD DE ENTRADA/SALIDA DEL FLUJO "INFLOW /OUTFLOW VELOCITY"	$\mathbf{u} = -\mathbf{n}u_0$ OI $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0$	Usado para una velocidad constante $u = \text{constante}$, o velocidad especificada por medio de una ecuacion. El vector unitario " \mathbf{n} " es normal a la superficie.
2	CONDICION DE SALIDA DEL FLUJO "OUTFLOW/PRESSURE, NO VISCOUS STRESS"	$p = p_0$ and $\eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$	Para esta condicion la salida del fluido debe ser perpendicular al contorno
3 y 4	CONDICION DE SIMETRIA "SYMMETRY BOUNDARY"	$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0$	Esta condición indica que no hay velocidad perpendicular en el area de una superficie, se lo utiliza para representar simetría
5 y 6	PARED "WALL"	$\mathbf{u} = 0$	Usado para indicar que la velocidad en la pared, u , es cero

Tabla IX. Condiciones de contornos en la simulación de flujos de fluidos [13].
[Fuente: Elaboración Propia]

Para la simulación de los modelos numéricos se requiere de parámetros de solución tales como el método de solución a utilizar para alcanzar la convergencia, el tipo de matriz y finalmente la dependencia del tiempo. El programa utilizado en este trabajo incluye diferentes métodos de solución para el sistema; en este caso se empleó el método "Direct (UMFPACK)". Otro de los parámetros a seleccionarse es el tipo de matriz del sistema, que para los modelos numéricos analizados es del tipo denominado "Automatic". Finalmente se escoge el último de los parámetros que se identifica por los siguientes números 0:0.2:5, que representan el incremento en el tiempo para la obtención de los resultados; por ejemplo la iteración empieza en $t=0$ con incremento de 0.2, y, finaliza en $t=5$ segundos.

Con todos los parámetros seleccionados como se mencionó en el párrafo anterior, se procede a la ejecución del sistema mediante el comando "solve" del menú principal del programa. A continuación en la tabla X, se presenta el tiempo de ejecución para cada modelo a las diferentes velocidades analizadas. El tiempo de ejecución en segundos es mostrado por el programa, una vez finalizada la simulación y haber alcanzado la Convergencia.

	Plano de flotación 3	Plano de flotación 2	Plano de flotación 1
Velocidad [m/seg]	Tiempo de Ejecución [min]	Tiempo de Ejecución [min]	Tiempo de Ejecución [min]
0,6	21,47	12,89	26,52
0,4	9,65	6,4	19,58
0,2	6,59	3,81	7,8
0,04	2,91	1,64	1,99

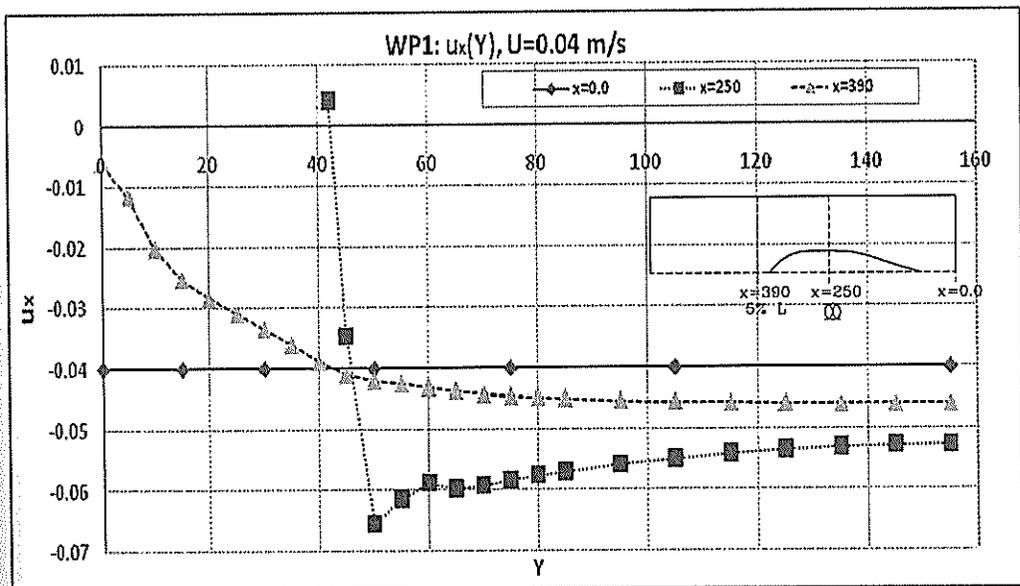
Tabla X. Tiempo de ejecución en la simulación para los modelos numéricos representativos de los planos de flotación.
[Fuente: Elaboración Propia]

Nótese que el tiempo de iteración para el plano de flotación 2 es menor que para los otros modelos, esto se debe a que el número de elementos en la malla es inferior a los restantes, obsérvese la tabla X. En el siguiente subcapítulo se presentan la visualización de los resultados obtenidos a diferentes cortes en el campo de velocidades obtenidos en el proceso de simulación numérica para los modelos especificados anteriormente.

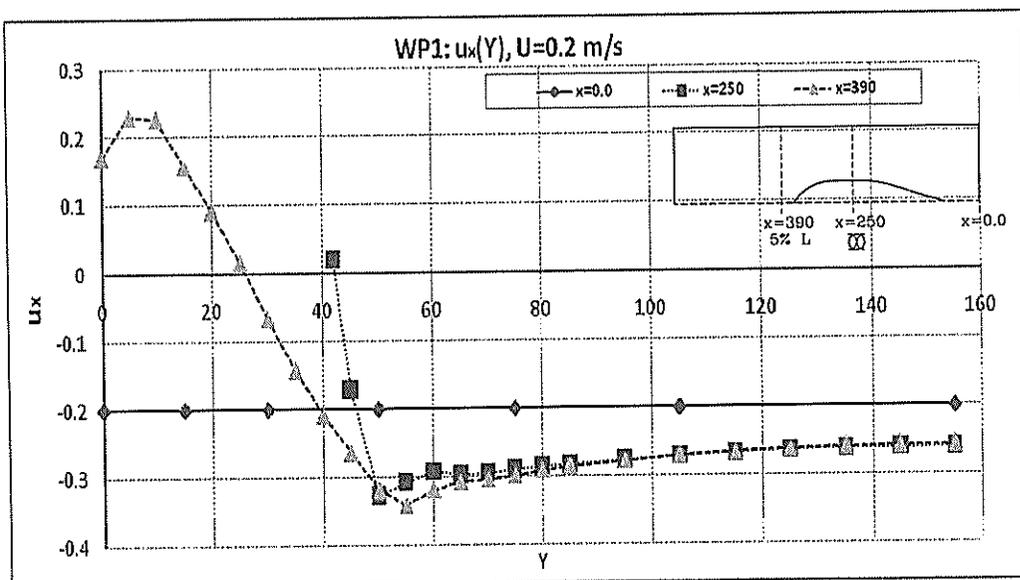
3.3 Campos de velocidad obtenidos para cada plano de flotación.

Una vez culminada la ejecución de la simulación numérica para cada plano de flotación, se prepararon cuatro gráficas para cada modelo, mostrando las velocidades en diferentes cortes a lo largo de los dominios. A continuación en las figuras 25, 26, y 27 se muestran los cortes realizados al inicio ($x=0.0$), en Sección Media, y a $5\%L$ a Popa de cada modelo, similares a los que se realizaron para analizar los resultados experimentales.

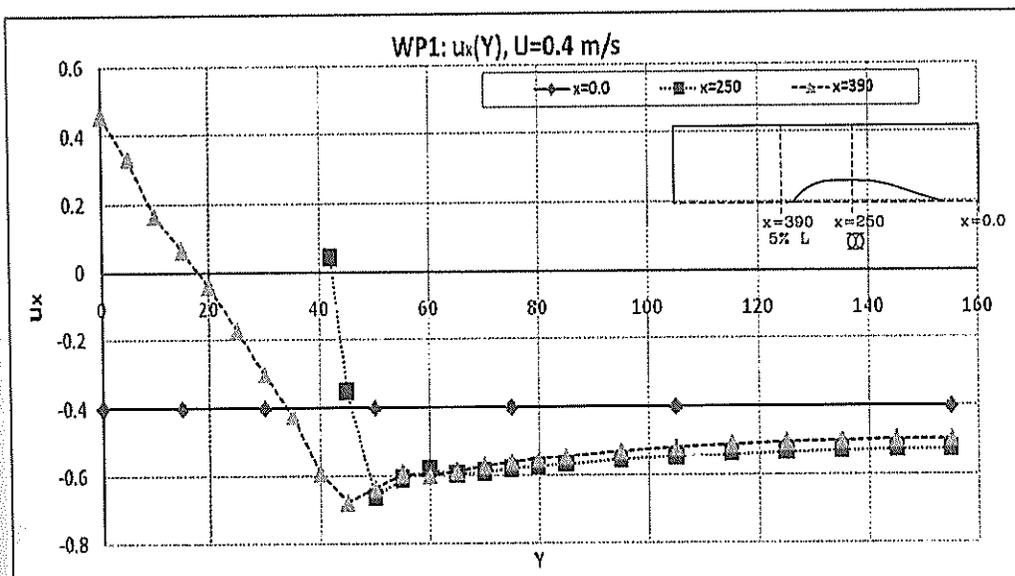
Figura 25. Solución numérica de las velocidades x en tres cortes para el Plano de Flotación 1.
[Fuente: Elaboración Propia]



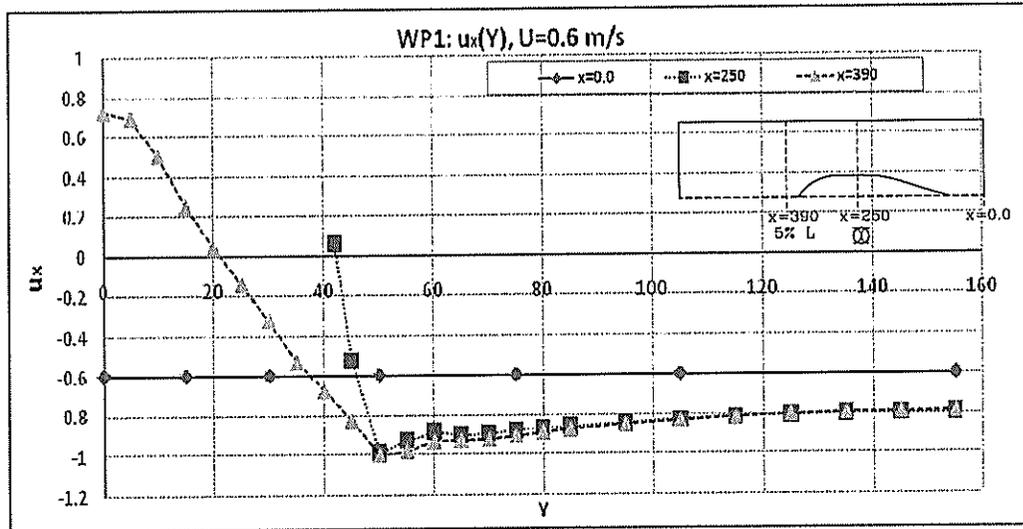
(a)



(b)



(c)

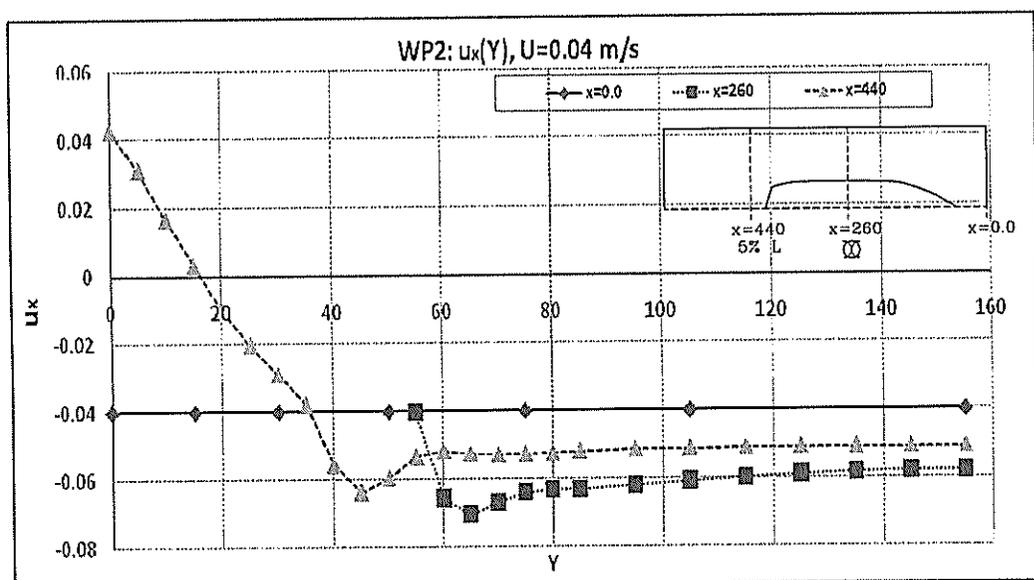


Tal como se esperaba, véase las gráficas (a) hasta (d) de las figuras 25 (igual para las figuras 26 y 27), la velocidad de entrada del flujo libre, en $x = 0.0$ mm, es constante, a diferencia de lo obtenido en el caso experimental. Recuérdese que la velocidad de flujo libre corresponde a una condición de frontera del problema.

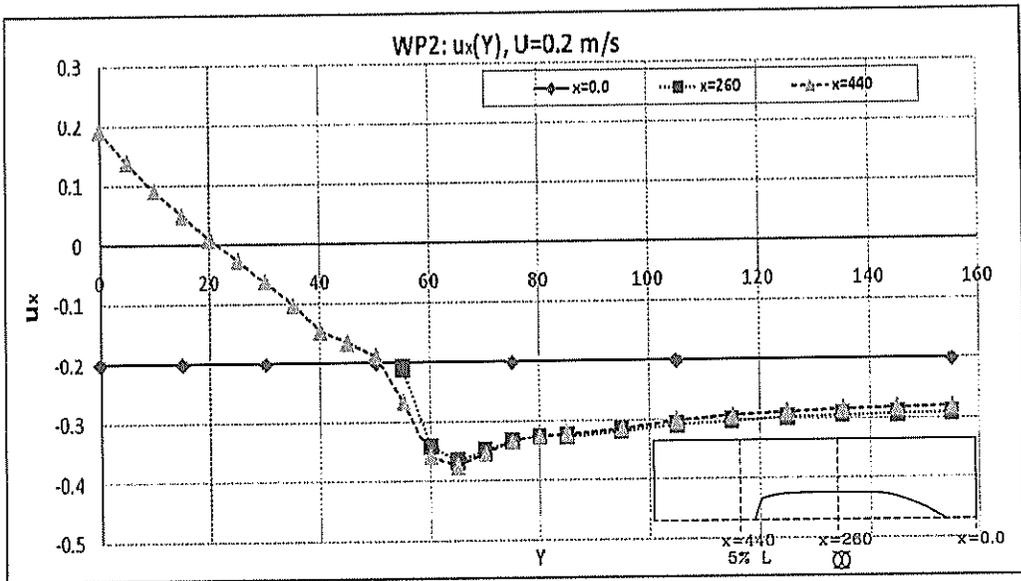
En los cortes realizados en Sección Media (a $x = 250$ mm), se puede apreciar separación de la capa límite dado que el punto más cercano al cuerpo presenta velocidad negativa. Es decir el punto de separación se presentó hacia proa de la Sección Media, influenciado por las formas del modelo. Nótese además que en la zona cercana al cuerpo se presentó un gradiente de velocidad en todos los casos de la figura 25.

A continuación se utilizará el término Contraflujo para describir el cambio de la dirección de la velocidad, es decir flujo invertido. Para el corte a $x=390$ mm, de las gráficas (c) y (d) se puede observar que el semiancho del contraflujo es de 20 mm esto implica un 50% de la semimanga del modelo, mientras que en la gráfica (b) el valor máximo del semiancho del contraflujo es de 27 mm; en cambio en la gráfica (a) no hay presencia de contraflujo debido a que es la velocidad mas baja analizada.

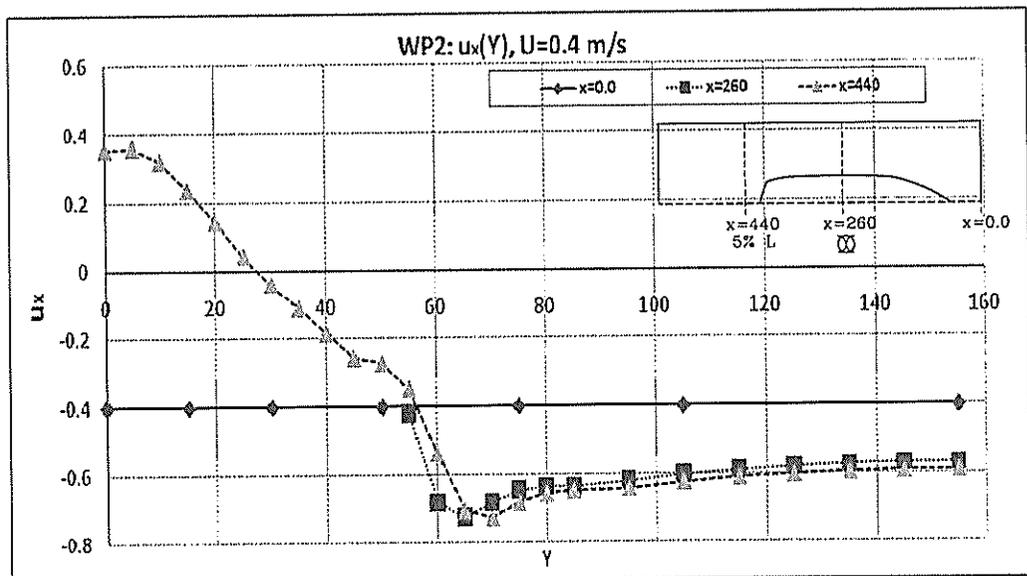
Figura 26. Solución numérica de las velocidades x en tres cortes para el Plano de Flotación 2.
[Fuente: Elaboración Propia]



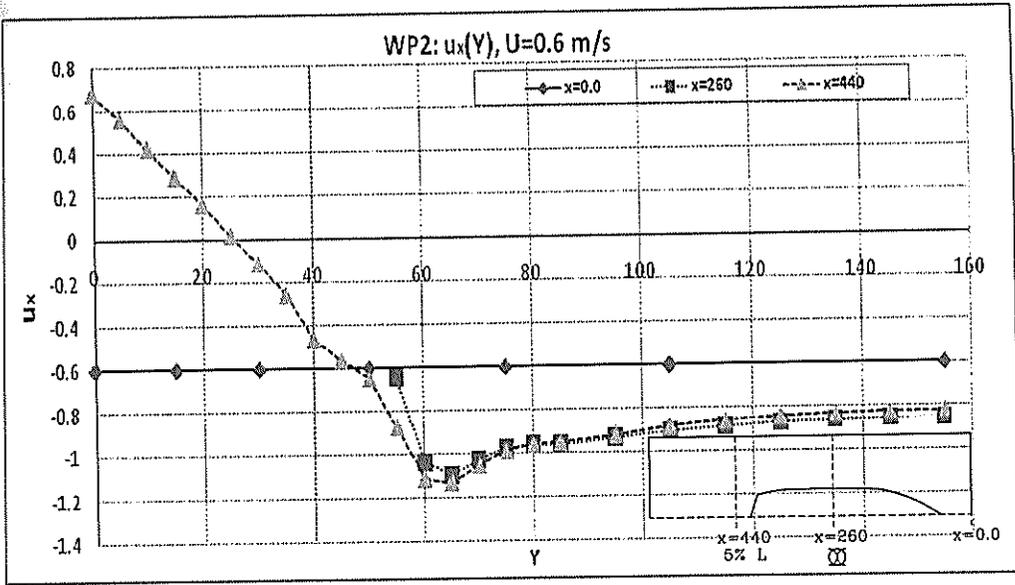
(a)



(b)



(c)

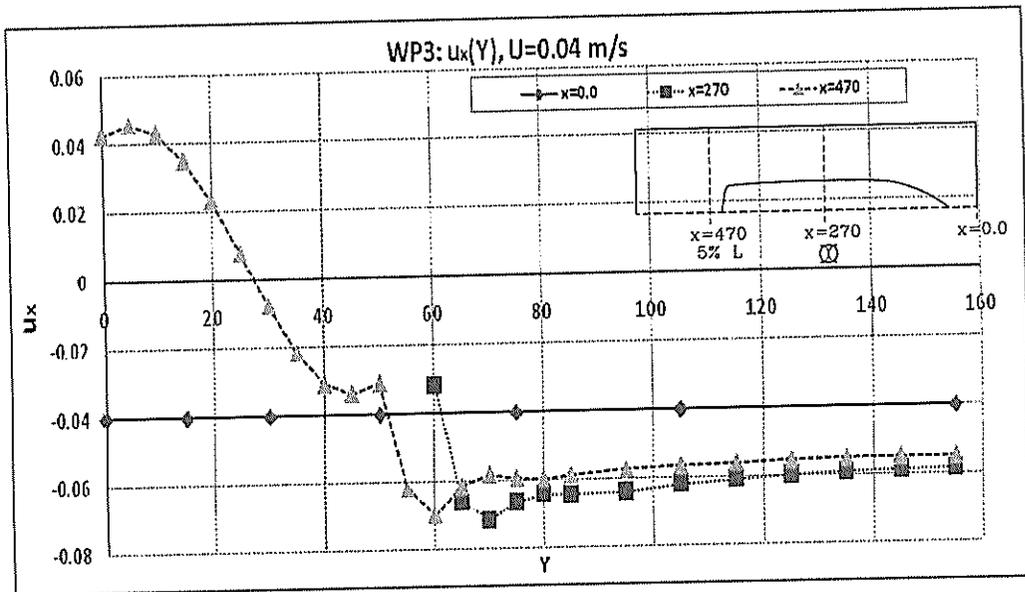


(d)

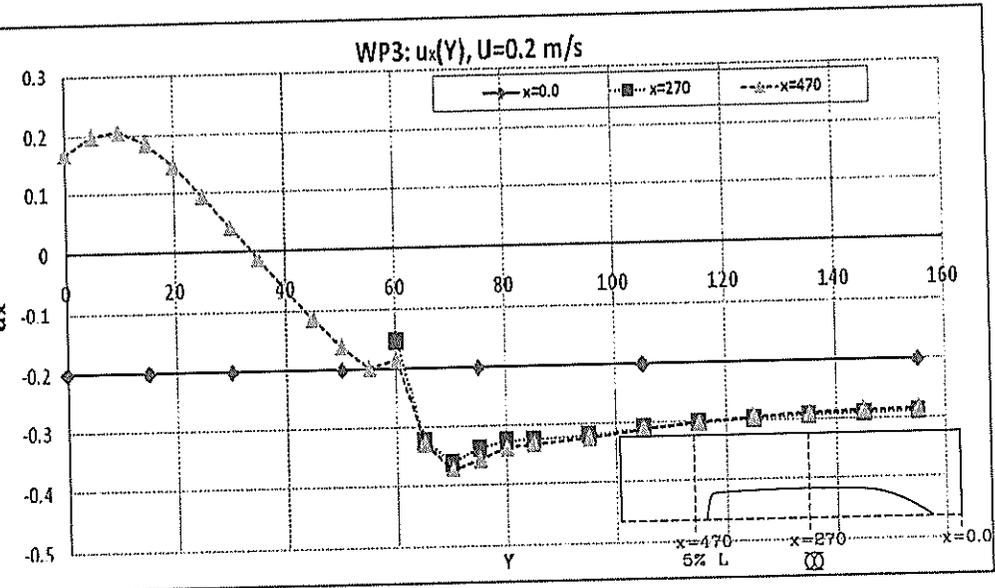
Nótese en forma general que para las condiciones analizadas, las velocidades en Sección Media, esto es, a $x = 260$ mm, presentan un aumento respecto a la velocidad del flujo libre (corte a $x = 0.0$ mm); esto se debe a la disminución de área de flujo por la presencia del cuerpo sólido. Nótese además que en cada gráfica existe un máximo en la velocidad y luego se presenta una reducción hasta quedar prácticamente constante en dirección de las "y". Los valores de los límites respecto a las velocidades del flujo libre (0.04, 0.2, 0.4, 0.6 m/seg) fueron de 0.03, 0.175, 0.35, y, 0.5 m/seg, respectivamente. Esto parece indicar que el límite de velocidad alcanzado en sección media es proporcional a la velocidad del flujo libre.

En las gráficas (c) y (d) de la figura 26, se observa que el semiancho del contra flujo es de 28 mm esto es el 56 % de $B/2$, mientras que para la velocidad de 0.2 m/seg (figura b) es de 20 mm. Finalmente para la velocidad de flujo libre más bajo es de 15 mm, esto es 40 % y 30 % de $B/2$ respectivamente. Nótese que el mayor valor de la velocidad del contra flujo es de 0.7 m/seg en cruzía a 0.6 m/seg de flujo libre.

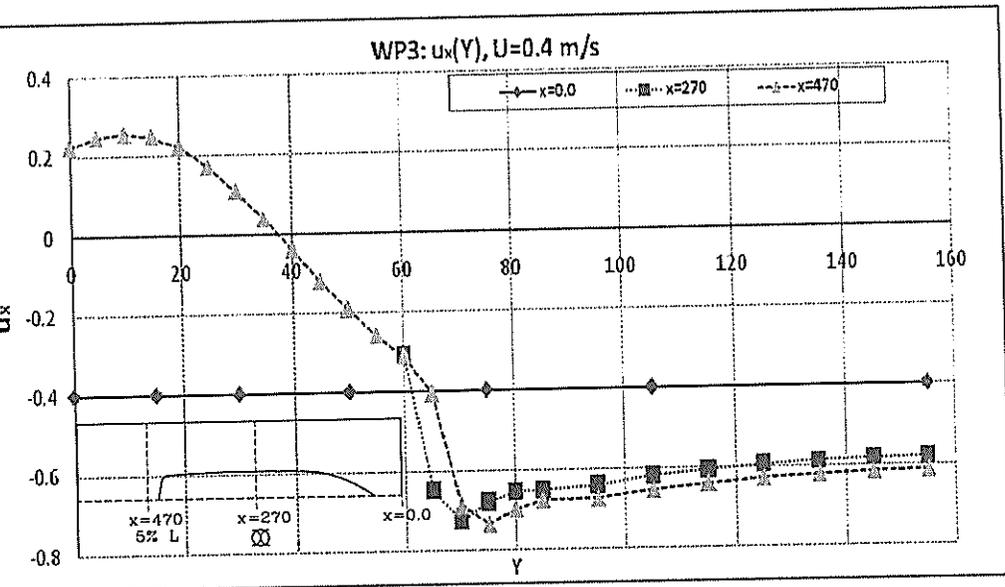
Figura 27. Solución numérica de las velocidades x en tres cortes para el Plano de Flotación 3.
[Fuente: Elaboración Propia]



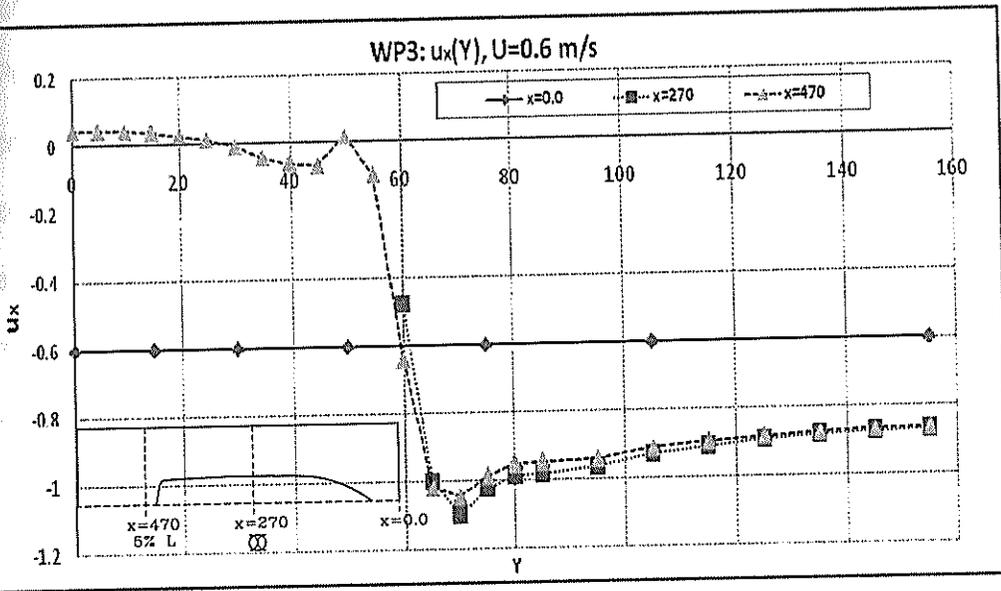
(a)



(b)



(c)



En Sección Media del modelo (a $x = 270$ mm) se presentan datos a partir de $y = 60$ mm, esto es a partir de 10 mm sobre la superficie del modelo aunque el mallado iba más cercano a la superficie del modelo; realmente no se encontró explicación para esta omisión. Nótese además que al igual que para el plano de flotación 2, existe un límite en la velocidad y luego se presenta una reducción hasta $y = 155$ mm; los valores de estos límites fueron 0.03, 0.16, 0.35, 0.5 m/seg, para las velocidades de flujo libre de 0.04, 0.2, 0.4, 0.6 m/seg respectivamente. Nótese además que los valores límites son similares a los obtenidos en los resultados del plano WP2.

En la figura (d) se observa que el semiancho del contraflujo en el corte a Popa ($x = 470$ mm) es de 30 mm, pero el máximo valor de la velocidad del contraflujo es de 0.05 m/seg en crujía del modelo. Los semianchos de las zonas de contraflujo obtenidos en las simulaciones a las velocidades analizadas (0.04, 0.2, y 0.4 m/seg) fueron de 27.5, 35, y 37.5 mm respectivamente. Nótese además que se presenta un máximo local en la velocidad para el corte a $x = 470$ mm, para todos los casos analizados, lo que se piensa que son producidas por las chinias del modelo.

CAPÍTULO 4

COMPARACIÓN DE LOS ANÁLISIS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS

Con los resultados Numéricos y Experimentales de los campos de velocidad alrededor de los planos de flotación obtenidos en los capítulos 3 y 2 respectivamente, se procede a la comparación de dichos resultados. Para esto se prepararon gráficos en dos cortes, a $x=5\%L$ a Popa del modelo, y a 60 mm a partir del primero, para cada modelo. En este capítulo se muestra además la comparación entre cada plano de flotación de las presiones actuantes sobre la superficie de cada modelo obtenidas numéricamente, para finalmente concluir con el cálculo de la resistencia Residual para cada plano de flotación.

4.1.- Comparación de resultados Numéricos y Experimentales.

En este apartado se procederá a la comparación de los resultados numérico-experimental. En la figura 28 se puede apreciar la ubicación de los cortes realizados a cada plano de flotación para los análisis respectivos.

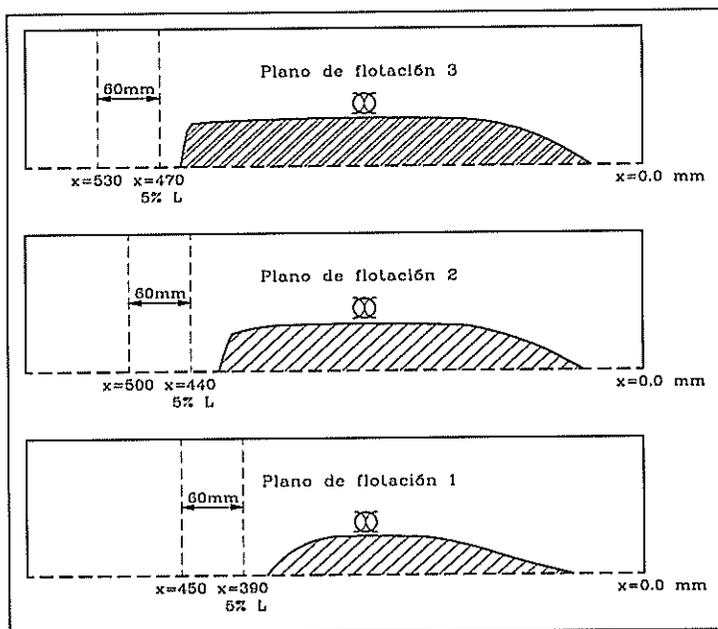


Figura 28. Cortes "x" en el campo de velocidades del flujo para la comparación Numérico-Experimental.
[Fuente: Elaboración Propia]

En las gráficas de las figuras 29 a la 40, se pueden observar la tendencia de las velocidades Numérico-Experimental en los cortes mencionados. Para cada plano de flotación se mostrarán los resultados con velocidades de flujo libre de 0.04 y 0.6 m/seg, que representan las velocidades extremas tratadas.

Figura 29. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 390$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.04$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

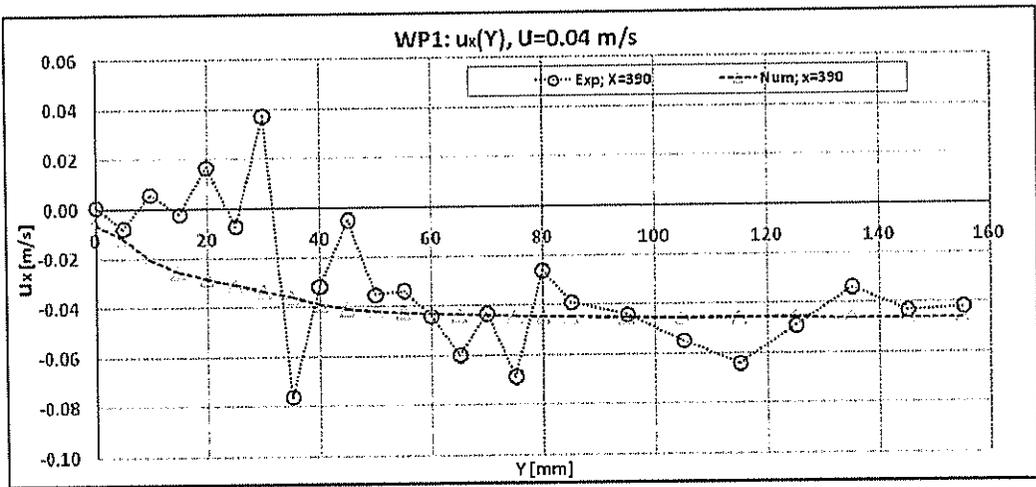
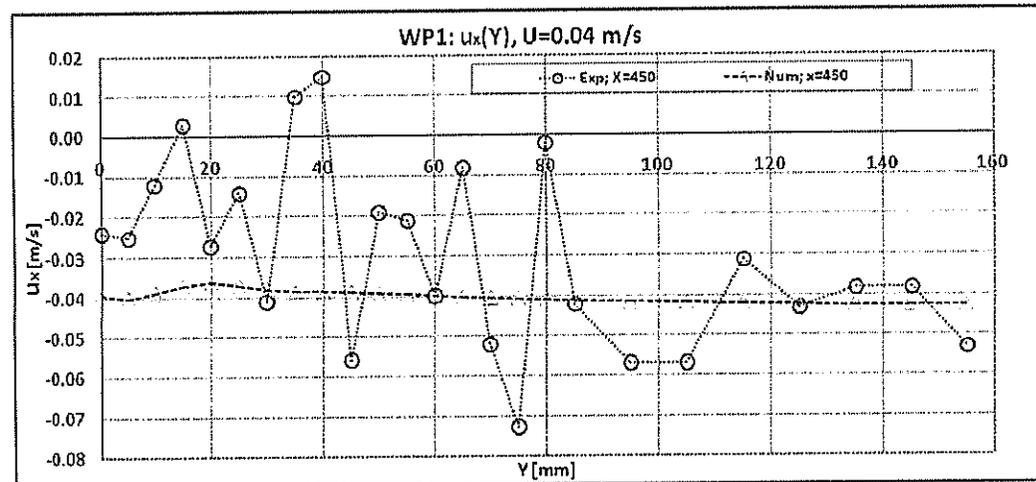


Figura 30. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 450$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.04$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]



En las figuras 29 y 30, se puede observar que a pesar de la dispersión de los resultados experimentales respecto a los numéricos, ambas distribuciones tienen la misma tendencia. Sin embargo, hay variación notable entre los diferentes valores experimentales, entre puntos consecutivos. Nótese además que en los cortes a $x=390$ y a $x=450$ mm, no hay presencia del contraflujo en los resultados numéricos, mientras que en los resultados experimentales existen valores extremos, que alcanzan la zona positiva en los rangos de y : 0 - 30mm para el corte a $x=390$ mm, y, de y : 0 - 40 mm para el corte a $x=450$ mm.

Figura 31. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 390$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.6$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

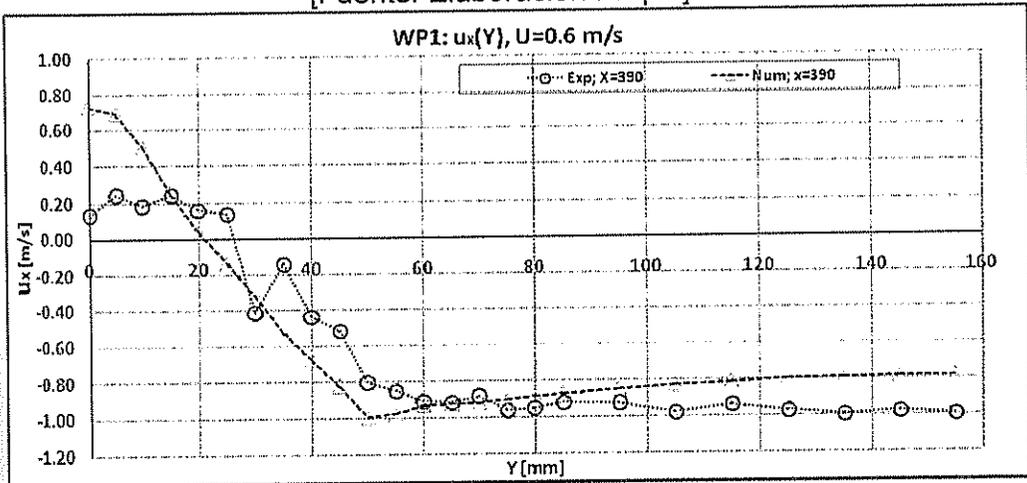
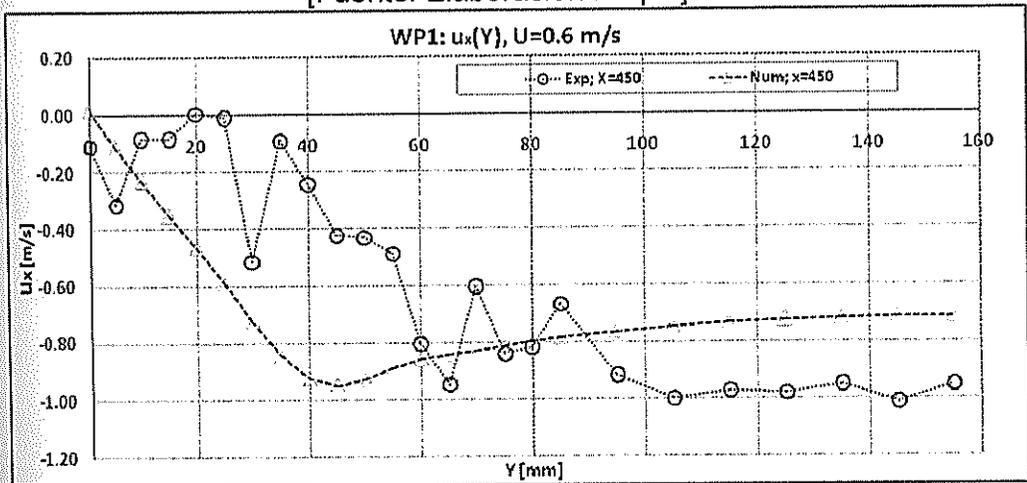


Figura 32. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 450$ mm para el Plano de Flotación 1, a $U=0.6$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]



En la figura 31, se nota la presencia de Contraflujo como resultado de la más alta velocidad en Flujo libre, recordándose que este corte se encuentra en la estela, justo detrás de popa del plano de flotación. En cambio, en la figura 32, no hay presencia del contra flujo.

Figura 33. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 440$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.04$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

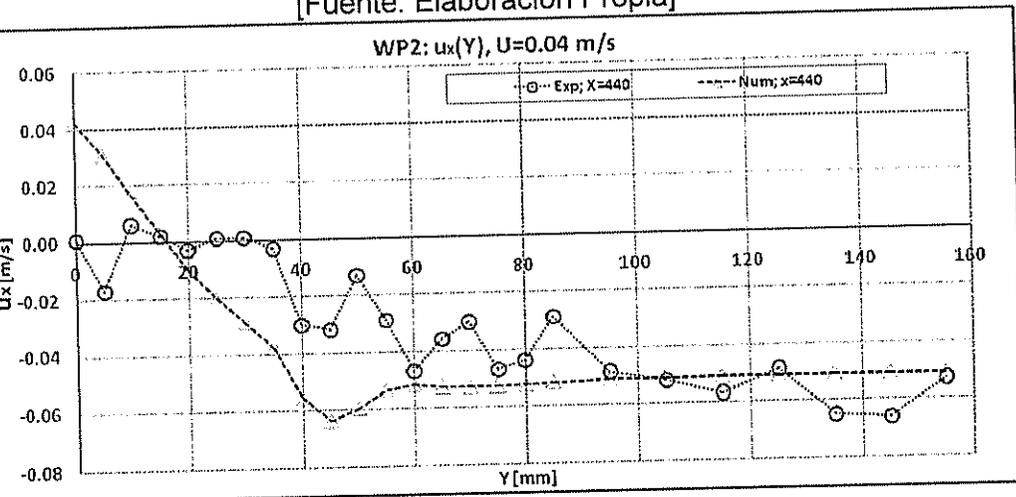
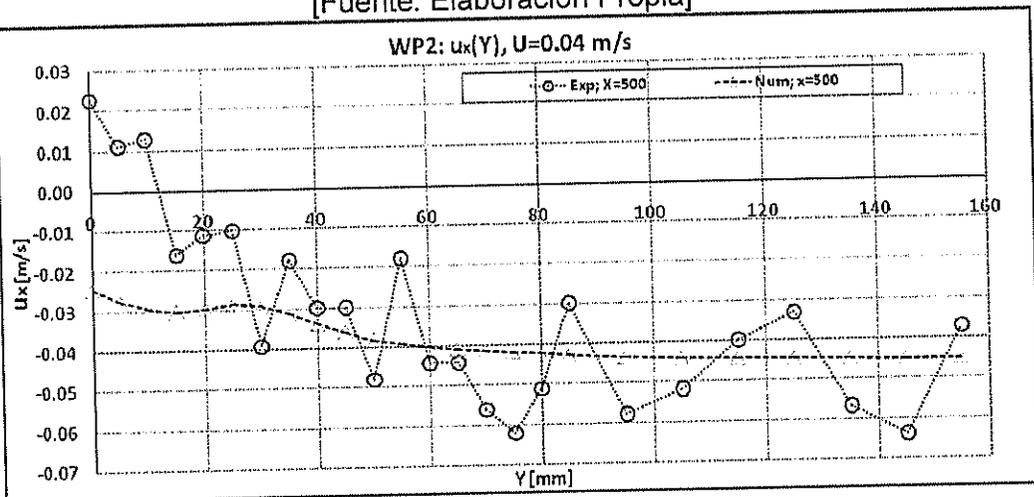


Figura 34. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 500$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.04$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]



se nota que las tendencias de ambas curvas son similares. En figura 33, se observa la presencia de una zona con Contraflujo, en los resultados numéricos; mientras que en los experimentales se alcanza un contraflujo pero de muy baja intensidad. En la figura 34, se muestra lo contrario, solo los resultados experimentales muestran la presencia del contra flujo.

Figura 35. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 440$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.6$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

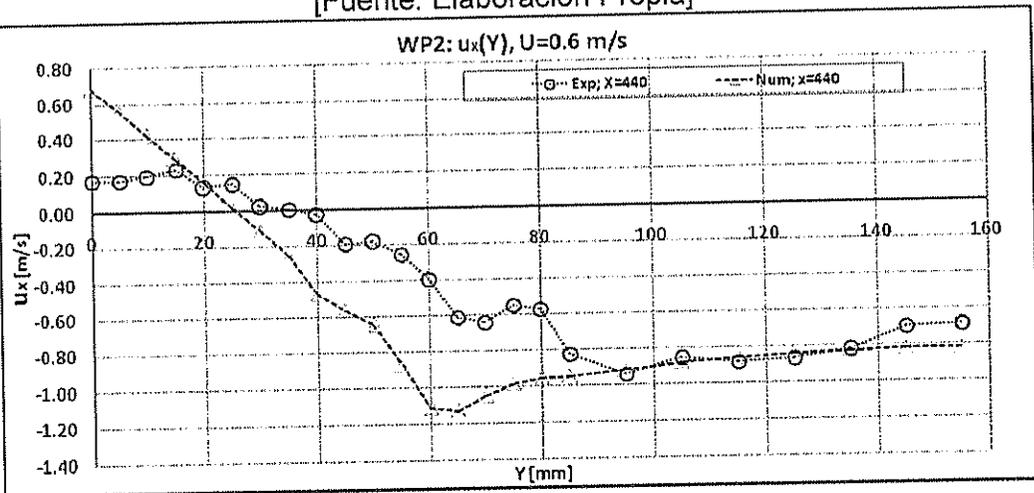
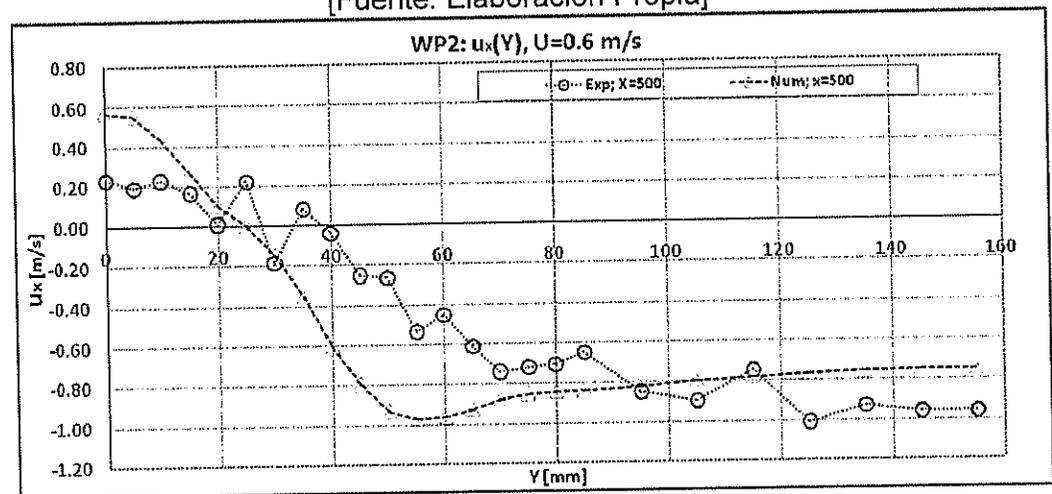


Figura 36. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 500$ mm para el Plano de Flotación 2, a $U=0.6$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]



Con el incremento de la velocidad se nota una más cercana aproximación entre los resultados numéricos y experimentales. Nótese que en la figura los resultados se aproximan a partir de $y = 95$ mm hasta $y = 155$ mm, mientras que en la figura 36, se observa similar tendencia de los resultados.

Figura 37. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 470$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.04$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

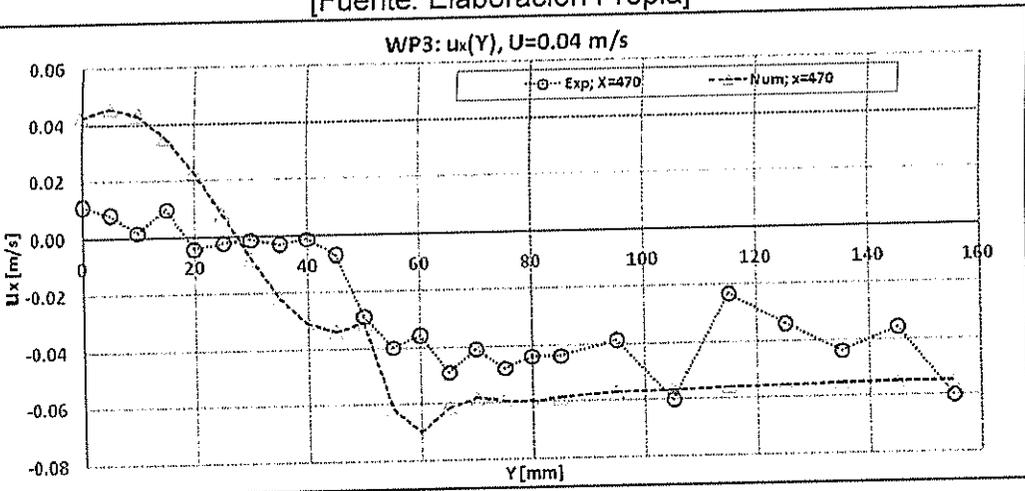
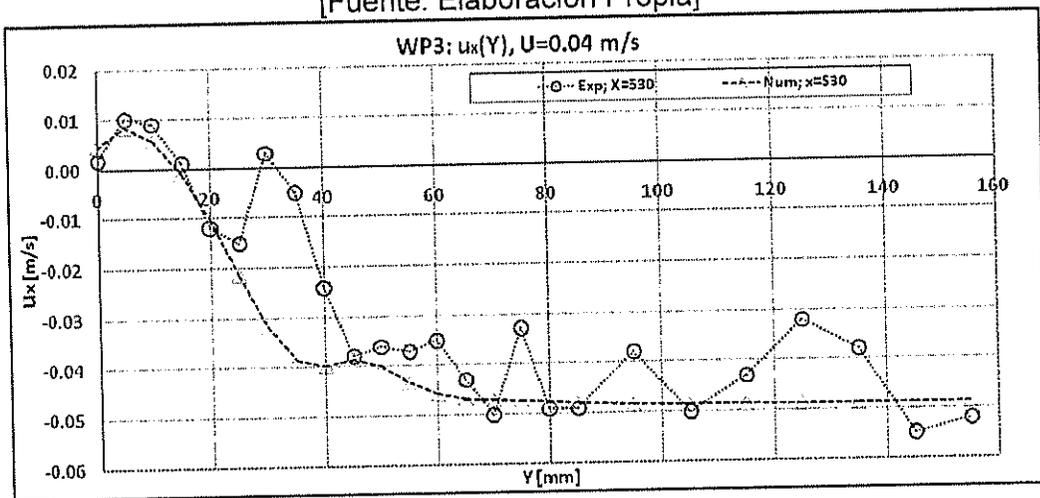


Figura 38. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 530$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.04$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]



En la figura 38, se puede observar una buena aproximación entre los resultados desde la crujía hasta $y=20$ mm. En la figura 39, se observa que las velocidades a partir de $y=60$ mm, para en caso Numérico tiende a 0.04 m/seg, mientras que para el caso numérico tiende a 0.06 m/seg.

Figura 39. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 470$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.6$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

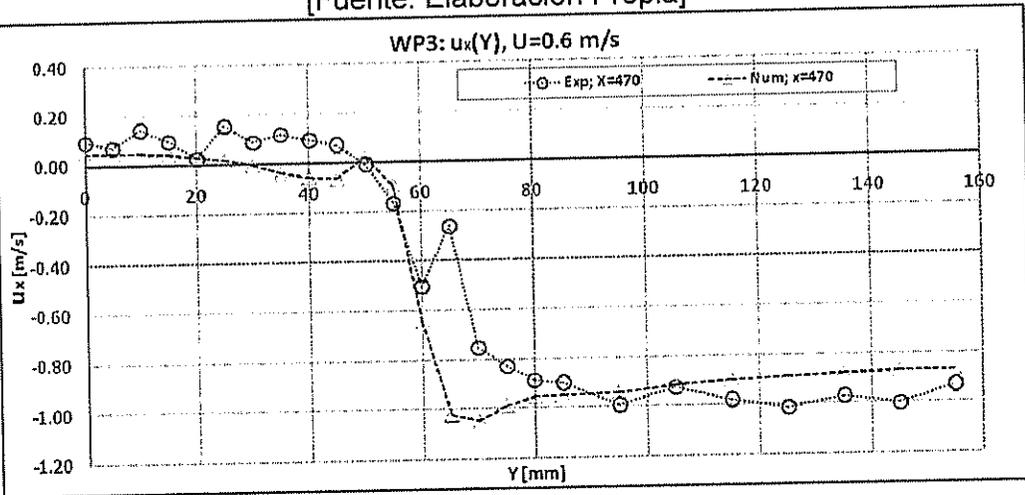
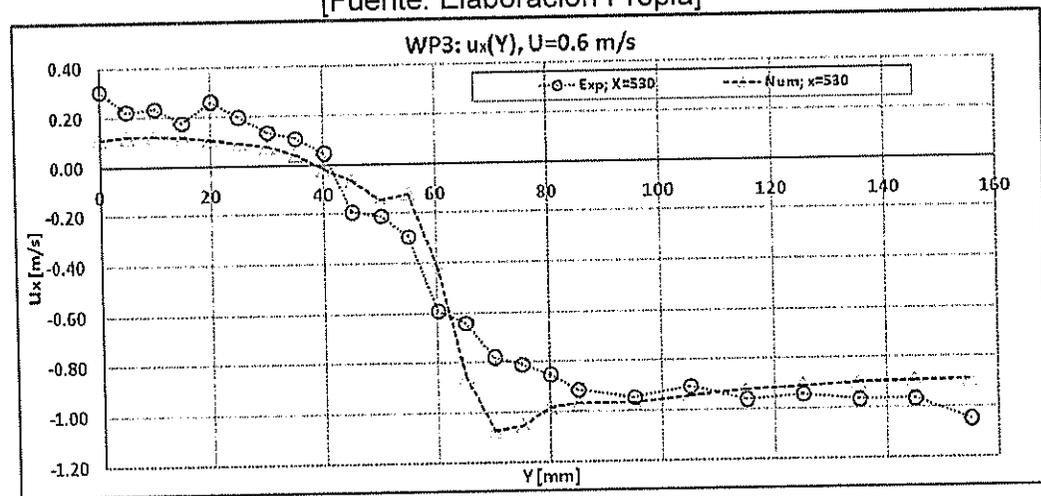


Figura 40. Comparación de los Resultados Numéricos-Experimentales en corte a $x = 530$ mm para el Plano de Flotación 3, a $U=0.6$ m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]



Para el caso del Plano de Flotación 3 a altas velocidades, nótese que existe una buena aproximación de las curvas obtenidas de los resultados numéricos e experimentales para los dos cortes realizados para las comparación pertinentes.

Comparación entre Planos de Flotación.

De los resultados del proceso de simulación numérica, se obtiene la distribución de presiones en el dominio analizado, y a continuación se analizará su distribución sobre el cuerpo. Es decir, se graficaron los valores de la presión en los nodos que están sobre la superficie del cuerpo como se observa en la figura 41.

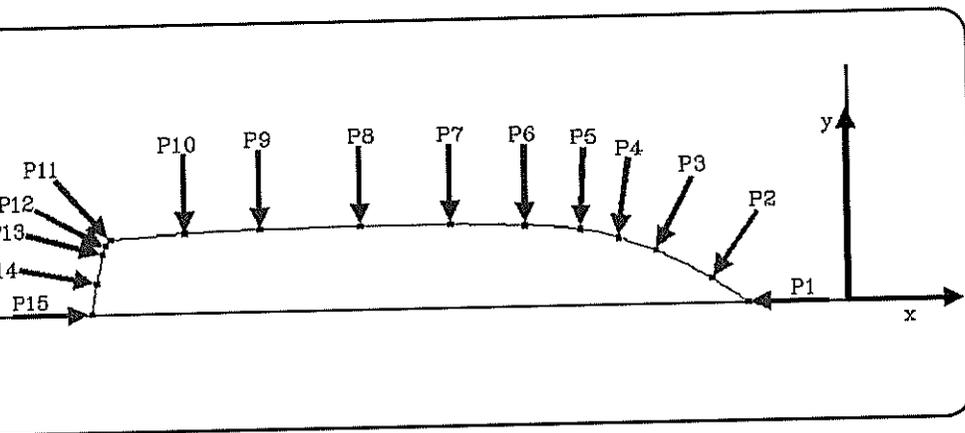
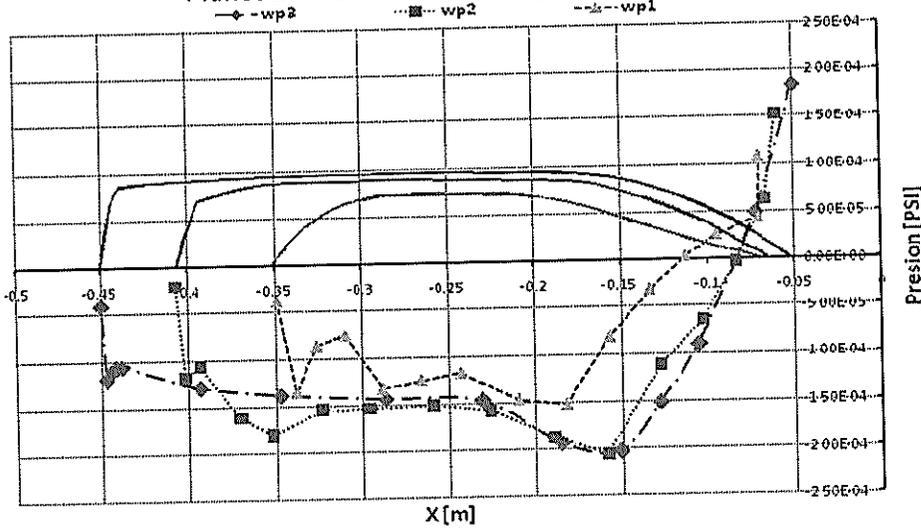


Figura 41. Esquematización de la distribución de presiones sobre la superficie de un plano de flotación. [Fuente: Elaboración Propia]

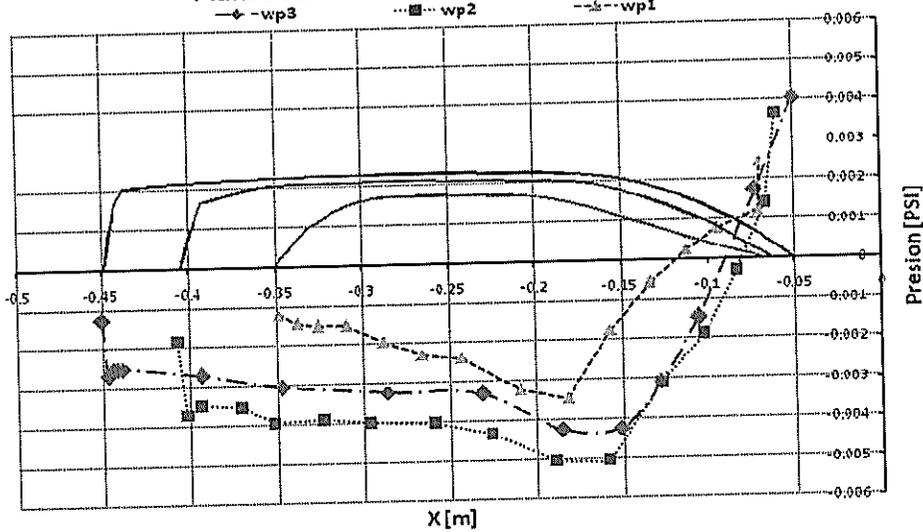
Planos de Flotación: Presión (x); U = 0.04 m/s



U=0,04m/s					
WP3		WP2		WP1	
P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]
-0,05	1,84E-04	-0,06	1,52E-04	-0,07	1,09E-04
-0,072282	4,92E-05	-0,066554	6,35E-05	-0,070506	4,40E-05
-0,105785	-9,09E-05	-0,083242	-2,68E-06	-0,094379	2,65E-05
-0,127917	-1,52E-04	-0,102176	-6,47E-05	-0,112196	3,92E-06
-0,151022	-2,03E-04	-0,127351	-1,13E-04	-0,133172	-3,14E-05
-0,185184	-1,93E-04	-0,158013	-2,05E-04	-0,156386	-8,17E-05
-0,230654	-1,47E-04	-0,188577	-1,87E-04	-0,181523	-1,52E-04
-0,286466	-1,44E-04	-0,22552	-1,58E-04	-0,209201	-1,46E-04
-0,347198	-1,39E-04	-0,258341	-1,51E-04	-0,242816	-1,17E-04
-0,393141	-1,29E-04	-0,295943	-1,54E-04	-0,265366	-1,24E-04
-0,438189	-1,06E-04	-0,32316	-1,54E-04	-0,287967	-1,33E-04
-0,440849	-1,07E-04	-0,370256	-1,62E-04	-0,309655	-7,59E-05
-0,443562	-1,10E-04	-0,393346	-1,07E-04	-0,325927	-8,65E-05
-0,446889	-1,18E-04	-0,401607	-1,19E-04	-0,337779	-1,35E-04
-0,45	-4,04E-05	-0,406629	-2,07E-05	-0,348453	-3,69E-05

Figura 42. Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para U=0.04 m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

Planos de Flotación: Presión (x); U = 0.2 m/s

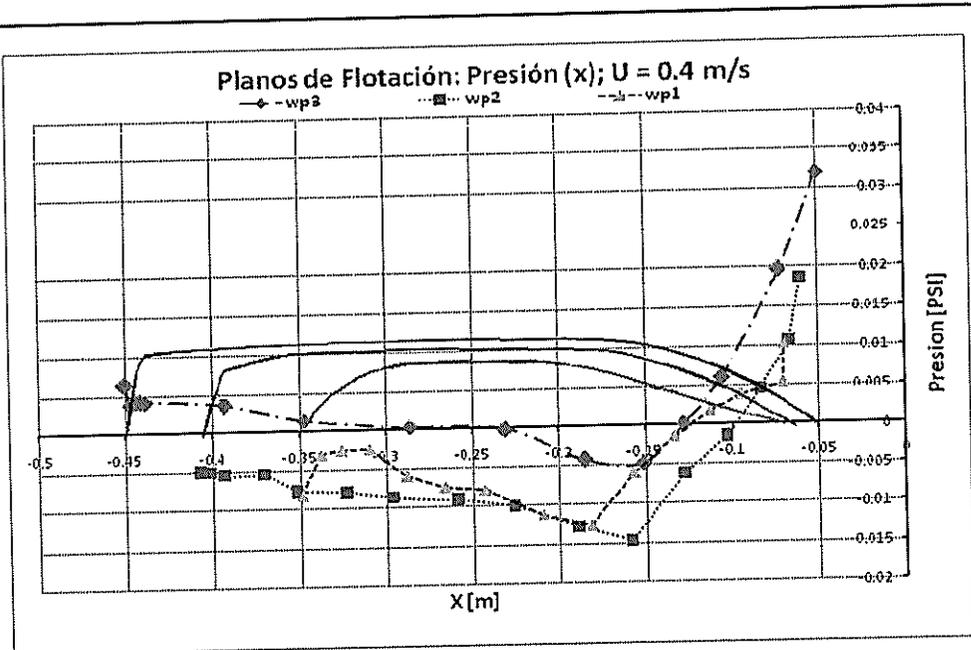


U=0,2m/s

WP3		WP2		WP1	
P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]
-0,05	0,004045923	-0,06	0,003649899	-0,07	0,002443723
-0,072282	0,001727706	-0,066554	0,001399508	-0,070506	0,001219195
-0,105785	-0,001469579	-0,083242	-3,05E-04	-0,094379	7,71E-04
-0,127917	-0,00306357	-0,102176	-0,001876412	-0,112196	2,29E-04
-0,151022	-0,004219636	-0,127351	-0,003081271	-0,133172	-5,84E-04
-0,185184	-0,004233545	-0,158013	-0,005035264	-0,156386	-0,001757062
-0,230654	-0,003282271	-0,188577	-0,005022627	-0,181523	-0,003434006
-0,286466	-0,003202369	-0,22552	-0,004314977	-0,209201	-0,003194657
-0,347198	-0,003021064	-0,258341	-0,004020203	-0,242816	-0,002390105
-0,393141	-0,002697157	-0,295943	-0,003978309	-0,265366	-0,002282796
-0,438189	-0,002498051	-0,32316	-0,003876381	-0,287967	-0,001957006
-0,440849	-0,00249856	-0,370256	-0,003514184	-0,309655	-0,001505985
-0,443562	-0,002503844	-0,393346	-0,003460534	-0,325927	-0,001503257
-0,446889	-0,002668679	-0,401607	-0,003710899	-0,337779	-0,001435041
-0,45	-0,001269681	-0,406629	-0,001822498	-0,348453	-0,001209796

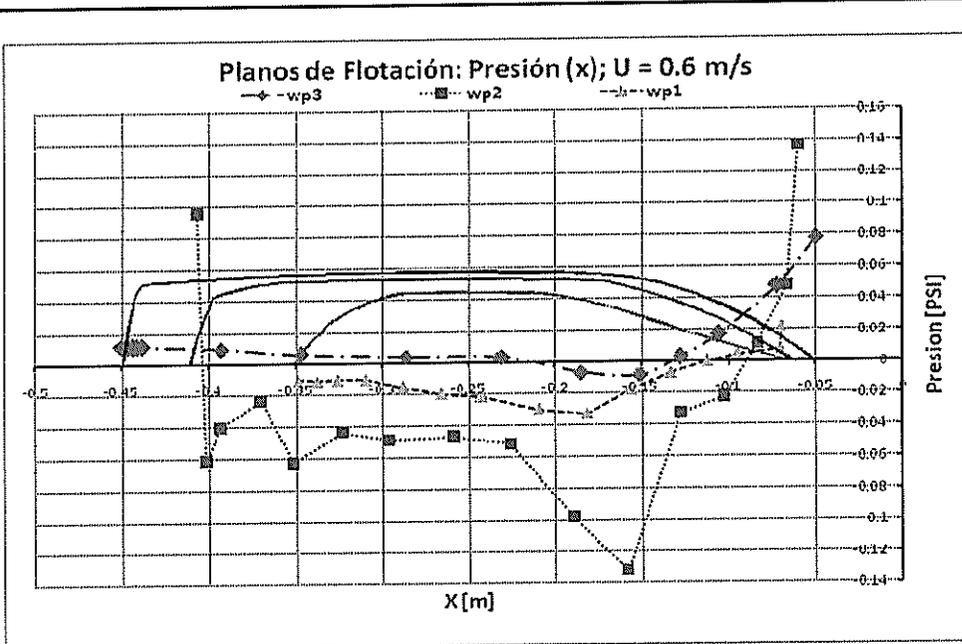
Figura 43. Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para U=0.2 m/seg.

[Fuente: Elaboración Propia]



U=0,4m/s					
WP3		WP2		WP1	
P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]
-0,05	0,031976525	-0,06	0,018474417	-0,07	0,010259343
-0,072282	0,019657887	-0,066554	0,010673688	-0,070506	0,005213801
-0,105785	0,005960192	-0,083242	0,00452631	-0,094379	0,00378296
-0,127917	7,51E-05	-0,102176	-0,001448546	-0,112196	0,001732244
-0,151022	-0,004756599	-0,127351	-0,006170881	-0,133172	-0,001422885
-0,185184	-0,004250788	-0,158013	-0,014732124	-0,156386	-0,006040598
-0,230654	-1,43E-04	-0,188577	-0,012810576	-0,181523	-0,012675297
-0,286466	2,82E-04	-0,22552	-0,010059395	-0,209201	-0,011185531
-0,347198	0,001403506	-0,258341	-0,009078138	-0,242816	-0,007897431
-0,393141	0,003513753	-0,295943	-0,008646123	-0,265366	-0,007463876
-0,438189	0,004066144	-0,32316	-0,00785616	-0,287967	-0,005967785
-0,440849	0,004096515	-0,370256	-0,005435688	-0,309655	-0,002445314
-0,443562	0,004244172	-0,393346	-0,005448966	-0,325927	-0,002532659
-0,446889	0,003744881	-0,401607	-0,005071953	-0,337779	-0,003054838
-0,45	0,006342705	-0,406629	-0,004963488	-0,348453	-0,008142448

Figura 44. Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para U=0.4 m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]



U=0,6m/s					
WP3		WP2		WP1	
P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]	P. Long. [m]	PRESION [PSI]
-0,05	0,077879608	-0,06	0,136526815	-0,07	0,021684482
-0,072282	0,047695167	-0,066554	0,048082233	-0,070506	0,007399094
-0,105785	0,016942704	-0,083242	0,011460685	-0,094379	0,004692061
-0,127917	0,003187064	-0,102176	-0,022324779	-0,112196	1,27E-04
-0,151022	-0,008213993	-0,127351	-0,032468675	-0,133172	-0,007119673
-0,185184	-0,006343599	-0,158013	-0,131992684	-0,156386	-0,017635443
-0,230654	0,003748514	-0,188577	-0,098165673	-0,181523	-0,032748783
-0,286466	0,004401429	-0,22552	-0,051869189	-0,209201	-0,029993113
-0,347198	0,006164814	-0,258341	-0,046881829	-0,242816	-0,021488164
-0,393141	0,009610452	-0,295943	-0,048620111	-0,265366	-0,019687798
-0,438189	0,011626884	-0,32316	-0,043560439	-0,287967	-0,015354548
-0,440849	0,011544074	-0,370256	-0,023188377	-0,309655	-0,010340569
-0,443562	0,011556207	-0,393346	-0,040383257	-0,325927	-0,0101284
-0,446889	0,011733966	-0,401607	-0,061236747	-0,337779	-0,011132477
-0,45	0,011928749	-0,406629	0,0956562	-0,348453	-0,010089132

Figura 45. Comparación de la Distribución de Presiones Numéricas entre Planos de Flotación, para U=0.6 m/seg.
[Fuente: Elaboración Propia]

Si cada gráfica resume los resultados para una velocidad, entonces el primer valor debería coincidir para los tres planos de flotación. En cada figura se nota que las distribuciones no empiezan en el mismo valor, es decir, la presión de estancamiento no fue estimada correctamente. Esto se debe a que no se incluyeron suficientes nodos en esta zona del dominio. La distribución de presión alrededor de los planos de flotación se muestra en el Apéndice D.

En la figura 42 se puede observar similitud en la distribución de presiones desde Proa hasta Sección Media de los planos de flotación 2 y 3 aproximadamente. Nótese además que para el primer plano de flotación las presiones son relativamente menores respecto a las presiones de los otros dos planos.

A la velocidad de 0.2 m/seg como se aprecia en la figura 43, se observa similitud de las distribuciones de los planos de flotación 2 y 3, desde proa hasta un cuarto de la eslora de los modelos. Las presiones obtenidas numéricamente para el plano de flotación 2, muestran ser mayores en comparación de las obtenidas para los otros planos. La distribución de presiones para el plano de flotación 1, es menor que para los otros dos.

Con el incremento de la velocidad a 0.4 m/seg como se muestra en la figura 38. La curva de distribución de presiones para el plano de flotación 3, muestra una pequeña región dónde se aprecia presiones negativas. Nótese además que en proa y en sección media hacia popa se pueden observar presiones positivas, mientras que para los otros planos solo se tiene presiones positivas en proa de cada modelo.

En la figura 45, para la mayor velocidad analizada, 0.6 m/seg, se puede apreciar que los planos de flotación 2 y 3 presentan presiones positivas tanto en Proa como en Popa. Además en el plano de flotación 2 en casi toda la eslora las presiones son negativas, mientras que para el plano de flotación 3 se puede apreciar que ocurre lo contrario. Debe recordarse que si el fluido fuera ideal, se tendría una presión positiva en Proa, luego conforme se viaja hacia atrás, se vuelve negativa, y en la Popa, vuelve a ser positiva.

De manera general se puede observar que a medida que la velocidad se incrementa, las presiones negativas alrededor del plano de flotación 2 en casi toda la eslora, se incrementa más rápido que en los otros planos. Las presiones para el plano de flotación 3 con el incremento de velocidad se puede ver el cambio en casi toda la eslora de presiones negativas a positivas, mientras que para el plano de flotación 1 en casi todas las

velocidades mantiene la misma tendencia, esto es solo en proa se mantiene con presiones positivas.

Con los resultados de las presiones alrededor de los planos de flotación se procedió a integrarlas sobre la superficie y tomar la componente de la fuerza en dirección x, del flujo. Para esto, entre cada par de nodos consecutivos se promedió la presión, se estimó la longitud de aplicación de dicha presión, y se calculó la dirección de la normal al cuerpo. Esto para poder determinar la Resistencia de Presión por unidad de longitud, para luego comparar los resultados entre los planos, como se muestra en la figura 46.

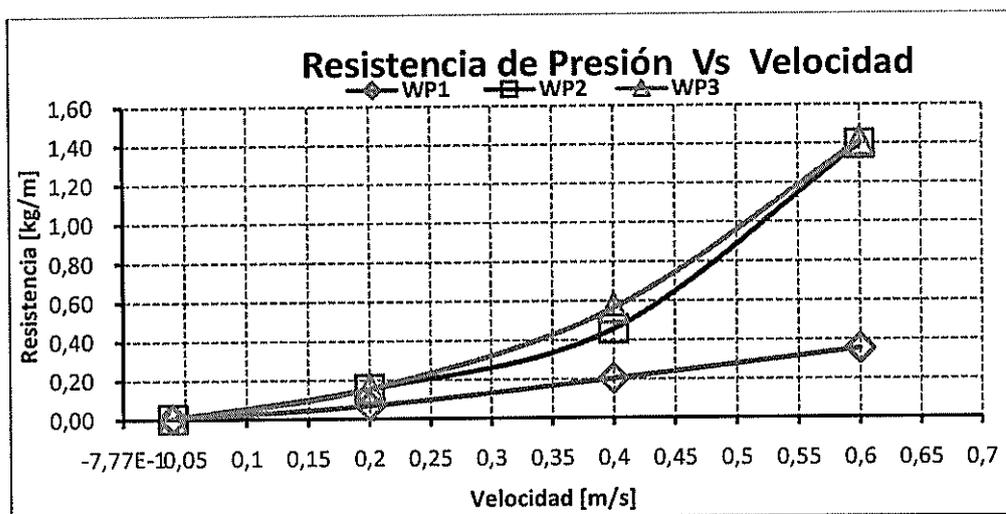


Figura 46. Comparación de la Resistencia de Presión entre Planos de Flotación. [Fuente: Elaboración Propia]

Como se puede apreciar en la figura 46, el plano de flotación 1 es el que presenta la menor resistencia, por ser el de menor área, y además no tiene espejo que ayude la formación de la Estela en la parte de Popa del modelo. La resistencia para los planos 2 y 3 a bajas velocidades, entre 0.04 y 0.2 m/seg, es bastante cercana. Nótese también que la resistencia de los planos 2 y 3 son prácticamente iguales, parece que la presencia de dos chinias en el plano 3, compensa el que tenga mayor área.

CONCLUSIONES

Luego de medir los campos de flujo bidimensionales alrededor de los planos de flotación de un buque pesquero, empleando la técnica de Anemometría Laser Doppler, y, de calcular dichos campos en forma numérica utilizando un programa de simulación que emplea el método de Elementos Finitos para la discretización espacial, se puede concluir:

1. De la revisión Bibliográfica, se deriva que cuando un fluido viscoso circula alrededor de superficies sólidas, se forman vórtices cercanos a la superficie del cuerpo debido a la separación de la capa límite. Las capas de fluido cercanas al cuerpo se enrollan hasta generar los vórtices, que luego son arrastrados por el propio flujo corriente abajo. La separación de la capa límite se la puede determinar por medio de la configuración del perfil de velocidad y la razón de incremento del espesor, los que a su vez dependen del gradiente de presión en dirección longitudinal. Cuando se incrementa la presión en la dirección del flujo, la presión detrás de cada partícula fluida (ayuda al movimiento), es menor a la presión en la parte frontal de ésta (se opone al movimiento), lográndose obtener un gradiente de presión adverso que incide en la separación de la capa límite. Finalmente si se tiene un gradiente de presión adverso elevado, este provoca que el flujo se invierta alterando la configuración del perfil de velocidad.
2. De los gráficos de las distribuciones de velocidad a lo largo de los tres planos de flotación de un buque pesquero, obtenidos mediante la técnica de Anemometría LDA, se estableció que no fue posible obtener un flujo uniforme en la entrada a la zona de mediciones. Se concluyó que esto se debe a la dirección del flujo en la descarga de la bomba. De las distribuciones de velocidad en las otras secciones a lo largo de los

modelos se observó que en el corte realizado en Sección Media de estos, no se notó presencia de flujo invertido (Contraflujo); esto permite concluir que hasta esa posición no hay presencia de gradiente de presión adverso que ocasione que el flujo se invierta y la capa límite se separe de la superficie de los modelos.

3. En las distribuciones de velocidad del último corte, realizado a $5\%L$ hacia Popa de todos los modelos, se evidenció la presencia de contraflujo, lo que confirma la formación de la estela de en la zona de Popa de los modelos. Finalmente se encontró que con el incremento de velocidad a partir de 0.2 hasta 0.6 m/seg la inversión del flujo también se incrementa, notándose máximos de velocidades de contraflujo de 0.241, 0.234, 0.155 m/seg, que representan el 40, 39, 26% de la velocidad del flujo libre (0.6 m/seg), para los Planos de Flotación 1, 2, 3, respectivamente.

4. De los resultados obtenidos en forma numérica aplicando el programa COMSOL de la distribución de velocidad en el corte a Sección Media del Plano de Flotación 1, se obtuvieron valores de máxima velocidad en la zona de contraflujo a 2 mm cerca de la superficie; representando el 10% de la velocidad del flujo libre, con lo que se concluye que para el plano mencionado la separación de la Capa Límite se presenta antes de la Sección Media en un punto a proa del plano de flotación. En cambio para los planos de flotación 2 y 3, se determinó que no existe presencia de Contraflujo, lo cual indica que la separación de la capa límite ocurre después de la Sección Media. Finalmente en el corte a Popa de los modelos, los resultados obtenidos demostraron que a las velocidades de flujo libre aplicadas a cada plano de flotación se nota la presencia de contraflujo, debido a la separación de la capa límite, resultados que se esperaban por estar este corte en la estela de los modelos.

5. Para la comparación de los resultados experimentales con los numéricos, se procedió a analizar el perfil de velocidad en el corte a $x=5\%L$ y además en una nueva posición a 60 mm hacia popa de dicho corte. Se determinó que para bajas velocidades, la comparación de los perfiles de velocidad demostraron tener la misma tendencia, aunque es notorio que los valores de las velocidades obtenidas experimentalmente muestran la influencia de múltiples factores aleatorios, que hacen que varíen ostensiblemente de posición a posición; este comportamiento es muy diferente a los resultados obtenidos de forma numérica. Además se pudo determinar que a la velocidad más alta analizada, 0.6 m/seg, se tiene buena coincidencia entre resultados numéricos y experimentales.

6. Luego de integrar la presión sobre los cuerpos y tomando la componente longitudinal de la fuerza se estimó la resistencia de Presión. La gráfica de esta componente de la resistencia versus la velocidad del flujo libre, muestra una razón de incremento notoria en los planos 2, y 3. Se piensa que esto es debido a la presencia de chinás. A diferencia de ellas, el plano de flotación 1 no muestra grandes aumentos de resistencia con el incremento de la velocidad, debido este no incluye china alguna. Esto confirma el concepto de que al diseñar una embarcación de Desplazamiento, se debe evitar que el espejo esté muy sumergido, porque de otra forma, la reducción de presiones en esta zona "succiona" al buque; esto es, incrementa la resistencia a la avance.

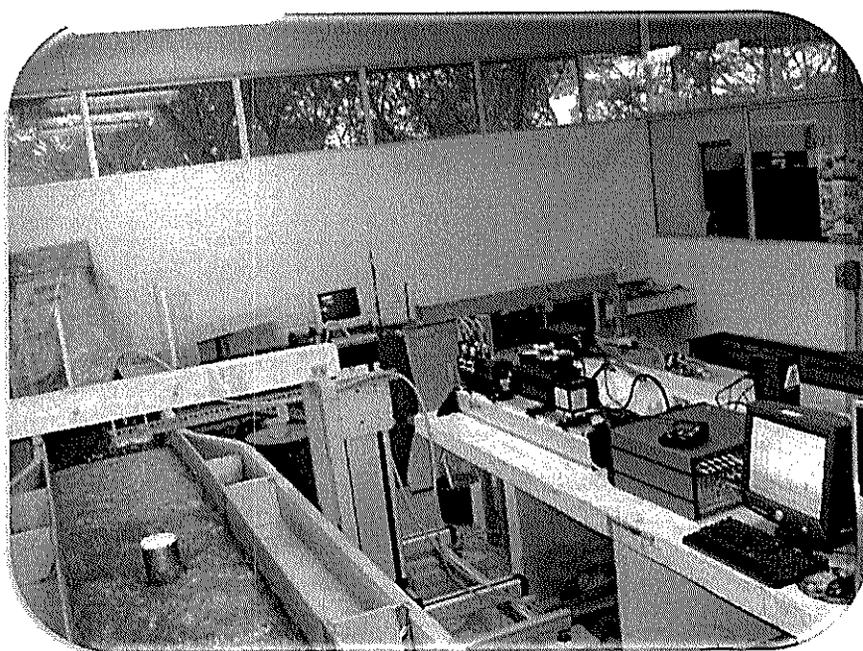
RECOMENDACIONES

1. Se recomienda para futuros proyectos, la elaboración de algún dispositivo que permita regular de manera continua la velocidad del flujo en la entrada de la zona de medición.
2. La elaboración de las formas de los planos de flotación con las herramientas del programa de simulación numérica COMSOL, resultó complicada. Se recomienda preparar las geometrías de los cuerpos a analizarse mediante la importación de dichas geometrías previamente elaboradas con el programa AutoCAD.
3. En un principio, para la Simulación Numérica bidimensional, se intentó trabajar con la opción Estable, pero debido a que no se logró alcanzar la convergencia de los resultados se decidió emplear el método Transiente. Para futuros proyectos se recomienda analizar en detalle los parámetros involucrados para la obtención de la convergencia de resultados empleando el método tipo Estable.

APÉNDICES

APÉNDICE A

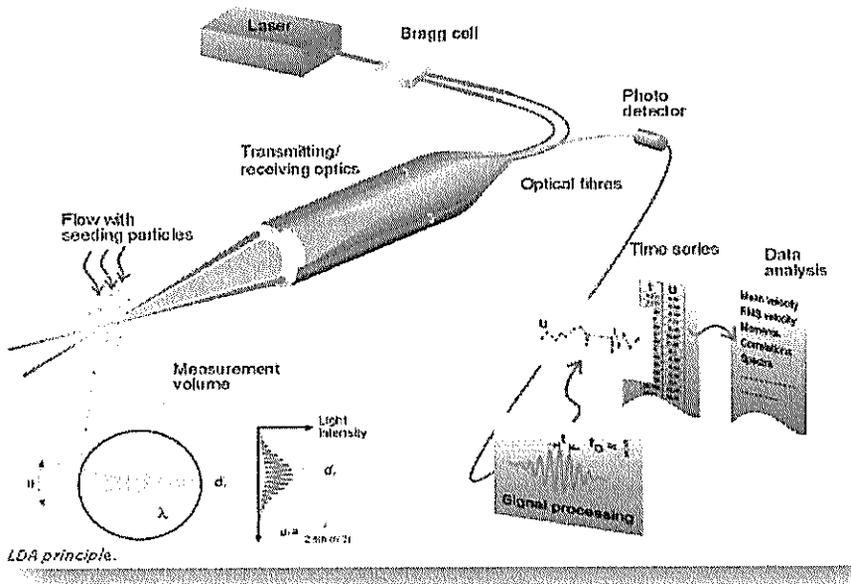
Descripción y Uso del Sistema de Anemometría Laser Doppler, LDA (Laser Doppler Anemometry)



A.1. Elementos y sus funciones.

La presente documentación contiene la descripción de cada elemento que forma el sistema LDA, "Laser Doppler Anemometry", su función y los pasos a seguir para la ejecución de un proceso experimental utilizando dicha técnica. De aquí en adelante el sistema será identificado con sus siglas **LDA** para mayor comodidad.

El sistema LDA tiene la capacidad de medir campos de flujo alrededor de cuerpos sumergidos, mediante la intersección de cuatro rayos laser. Cada par de rayos sirven para medir las componentes del vector velocidad en un punto. En la figura A1 se muestra un esquema del sistema.

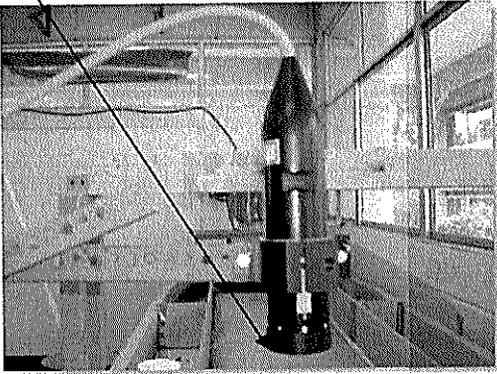
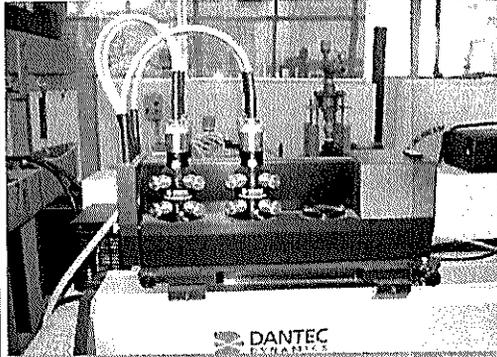
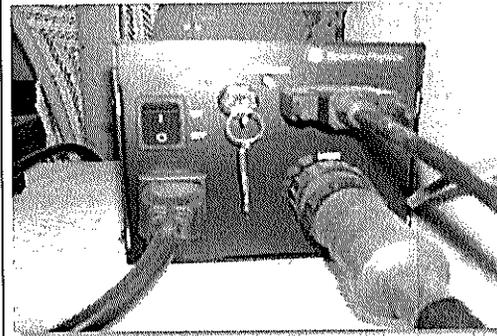


Esquema del sistema LDA

Fuente: <http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=1046>

A continuación en la figura A2 se describirá cada elemento que compone el sistema LDA.

Principales elementos y sus funciones.

<p style="text-align: center;">PROBETA</p> <p>Su función es la emisión de cuatro rayos laser, dos en dirección "X", y dos en dirección "Y". Estos laser se interceptan a una distancia de 40 cm desde la base de la probeta, y mide la velocidad del flujo en el punto específico de intersección de los rayos.</p>	<p style="text-align: center;"><u>BASE DE LA PROBETA</u></p> 
<p style="text-align: center;">CALIBRADOR DE LASER</p> <p>La función de este de instrumento es calibrar la intensidad de luz de los cuatros rayos laser que emite la probeta. Este instrumento consta de cuatro calibradores, uno para cada laser.</p>	
<p style="text-align: center;">GENERADOR DE LASER</p> <p>El objetivo de este instrumento, como su nombre lo indica, es la generación de los laser. Este instrumento requiere corriente eléctrica de 220 V.</p>	

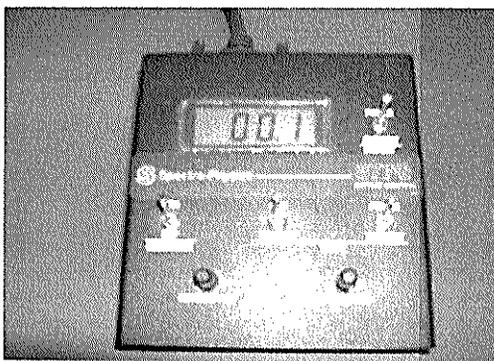
TRANSMISOR DE LASER

Recepta los laser generados y los trasmite al instrumento de calibración, para luego ser llevados hacia la probeta. Tiene ventilación incluida para evitar el calentamiento interno producido.



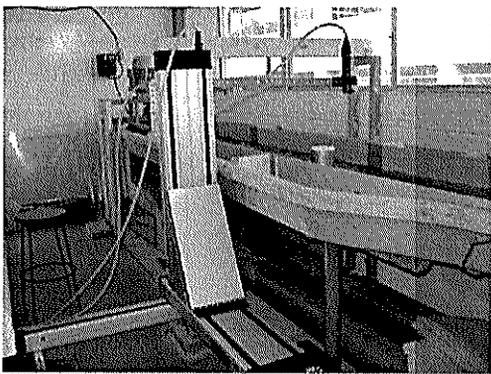
PROCESADOR DE SEÑAL

Regula la velocidad y la frecuencia de la emisión de los rayos laser, con el fin de regular la señal de adquisición de los resultados obtenidos y que luego serán visualizados en la pantalla del computador.



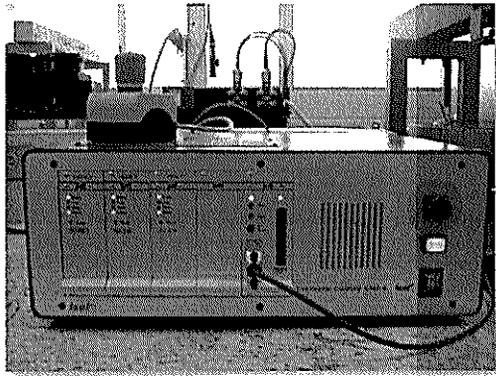
ROBOT

Su función es ubicar a la probeta en las coordenadas especificadas por el usuario en el computador. El alcance máximo en las direcciones espaciales "x", "y", y "z", para este tipo de robot es de 600 mm.



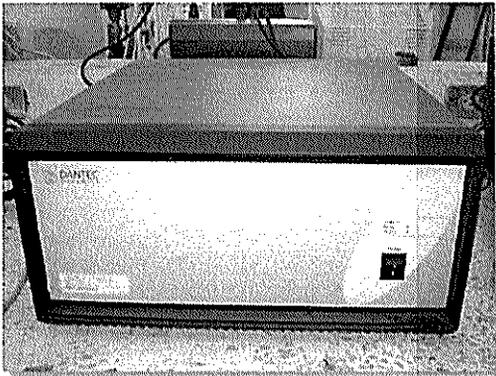
CONTROLADOR DEL ROBOT

El objetivo principal de este instrumento es la interacción entre el computador mediante el software BSA Flow V.4.10, y el robot. El controlador recibe las coordenadas especificadas (x, y, z) por el usuario y da la señal para el movimiento del robot hasta los puntos especificados.



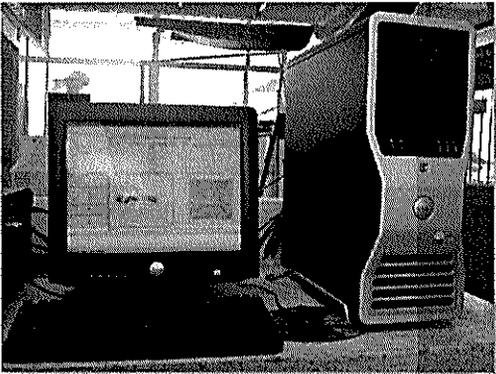
PROCESADOR DE DATOS

Recepta la información obtenida mediante las señales emitidas por la intersección de los laser, y luego la procesa para posteriormente obtener la visualización de los resultados en la pantalla.



COMPUTADOR

Por medio del computador se puede visualizar el campo de velocidades alrededor de cuerpos, mediante el software anteriormente mencionado. Permite obtener los resultados experimentales en archivos Txt, Excel, entre otros.

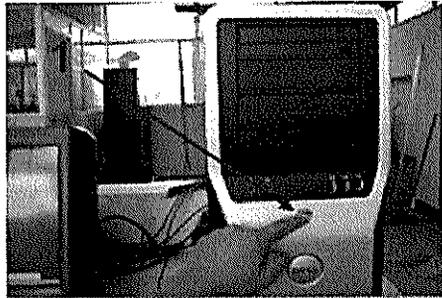


A.2. Proceso experimental utilizando la técnica LDA.

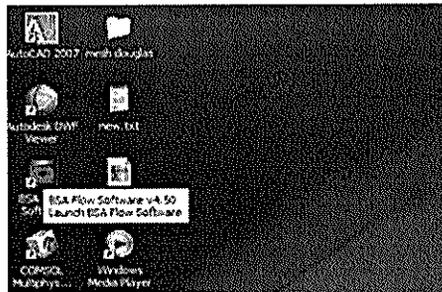
En esta parte se describirán los pasos a seguir para la obtención de resultados experimentales utilizando la técnica LDA como se observa en la figura A3.

Pasos para activar los instrumentos del sistema LDA.

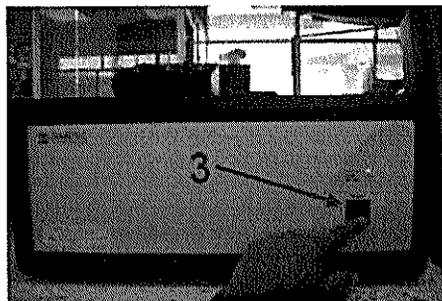
1. Encender el computador y el monitor.



2. Activar el programa BSA Flow en el computador.



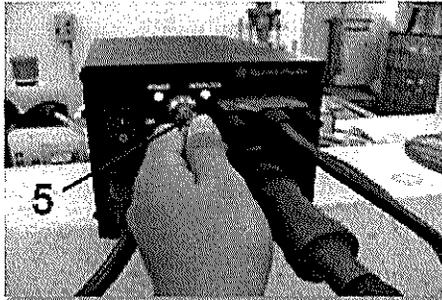
3. Encender el procesador de datos.



4. Encender el controlador del robot.



5. Finalmente encender el generador de laser.



Nota:

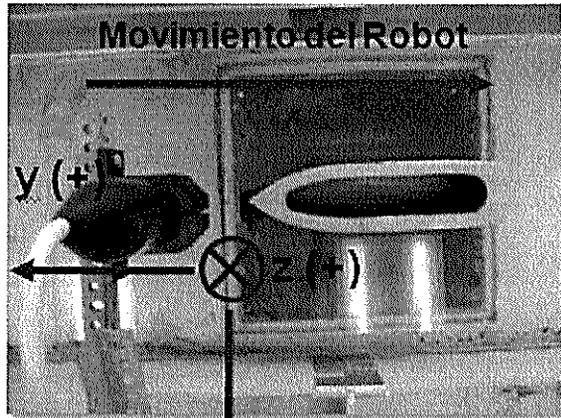
Con estos 5 primeros pasos el usuario se asegura que esté completamente encendido y ensamblado todo el sistema LDA.

Antes de mostrar los siguientes pasos para el uso del equipo LDA, se debe explicar cómo está adaptado el sistema de referencia del robot en el canal de circulación. A continuación se muestra en la figura A4 el sistema de referencia requerido para los análisis.

Sistema de referencia para el uso de la técnica LDA.

En la figura (a) se muestra el Origen del sistema de referencia utilizado para el análisis experimental de un modelo.

En la figura (b) se muestran los comandos de direccionamiento del robot mediante el teclado del computador.



X (+)

(a)

1. Direcciona al robot hacia las x (+).

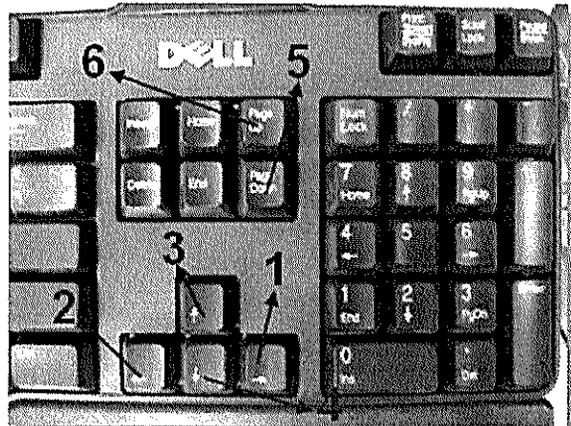
2. Direcciona al robot hacia las x (-).

3. Direcciona al robot hacia las y (+).

4. Direcciona al robot hacia las y (-).

5. Direcciona al robot hacia las z (+) "hacia abajo".

6. Direcciona al robot hacia las z (-) "hacia arriba".



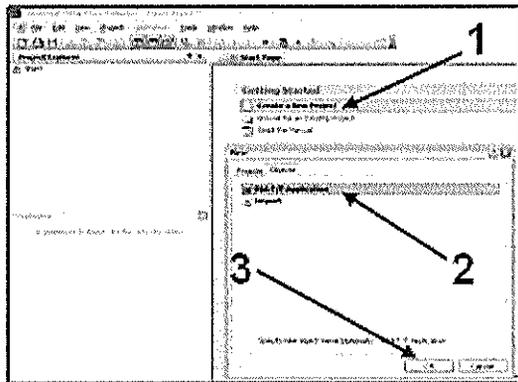
(b)

Una vez que se ha establecido el sistema de referencia para el posicionamiento del robot, se mostrará a continuación en la figura A5 los pasos a seguir para el manejo del programa BSA Flow. Con su uso se podrá visualizar el campo de velocidad alrededor de cuerpos sólidos, y la obtención de los resultados en diferentes formatos de textos.

Pasos para la ejecución del BSA Flow software para aplicar el equipo LDA.

Para crear un nuevo proyecto:

1. Crear un nuevo proyecto.
2. Seleccione aplicación del BSA.
3. Seleccione OK.



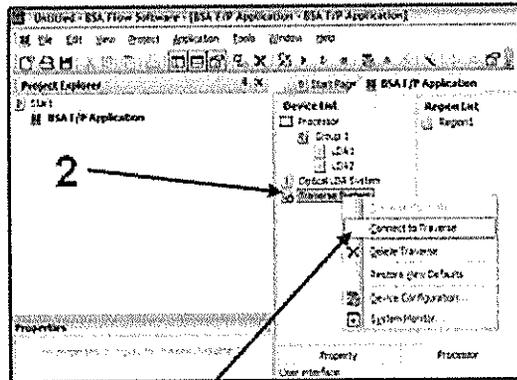
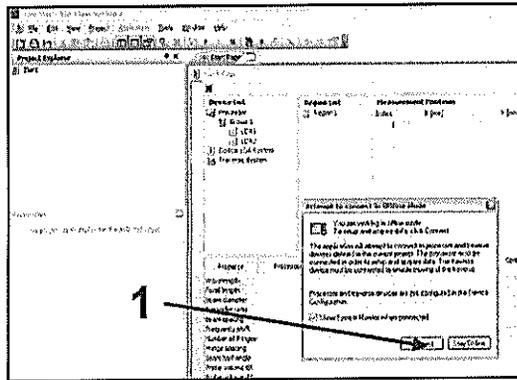
Para activar el procesador de datos y el sistema para el direccionamiento del robot al computador.

Una vez creado un nuevo proyecto, el programa muestra un cuadro de diálogo para conectar el procesador de datos al computador, y posteriormente se conecta el sistema con el mecanismo para el control del robot.

1. Seleccione "connect".
2. Seleccione, "Traverse System".
3. Seleccione "Connect to Traverse".

Nota:

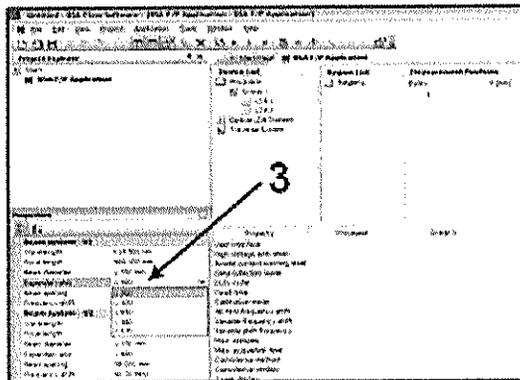
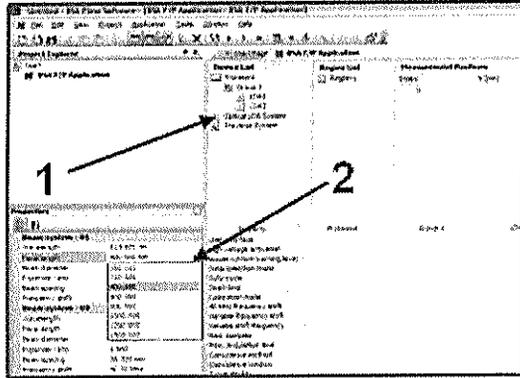
Los pasos 2 y 3 se deben repetir después que hayan transcurrido 9 segundos.



Cambiando parámetros para el alcance de medición del laser:

Esta opción permitirá seleccionar el alcance de medición del laser que en el caso de la probeta disponible es de 40 cm desde la base.

1. Seleccione "Optical LDA System". Con esta opción aparecerá el cuadro de propiedades, para cambiar los parámetros requeridos.
2. Seleccione con el botón derecho del ratón la opción "Focal Length" y escoja 400 mm.
3. Finalmente con el botón derecho del ratón escoja la opción "Expend ratio", y seleccione 1.000.



Nota:

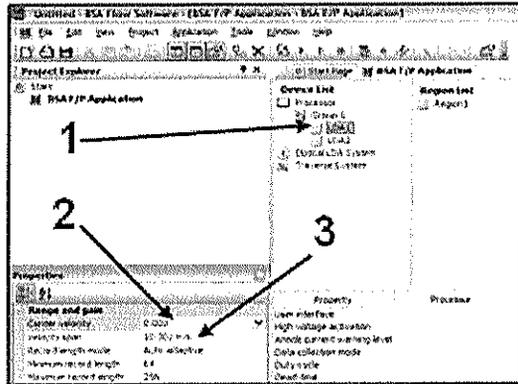
En el cuadro de propiedades hacer los pasos 1 al 3 tanto para U1 como para U2, los demás parámetros no son modificados.

Rango de velocidad para los canales de velocidad LDA's.

En la figura se puede observar los subdirectorios LDA1 y LDA2, que representan los canales de velocidad para cada par de laser que están contenidos en Group 1.

Seleccionando con el ratón LDA1 el usuario podrá seleccionar el valor medio y el rango máximo de la velocidad; por ejemplo, si se está realizando una prueba a una velocidad de entrada del flujo de 0.6 m/seg, para la medición se selecciona el centro de velocidad en 0.000 en un rango de -2.542 a 2.542 m/seg.

Los demás parámetros se dejan por omisión del software.



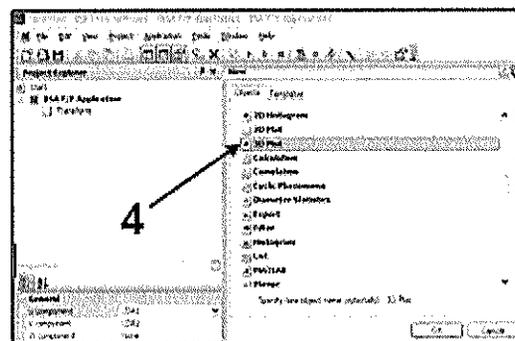
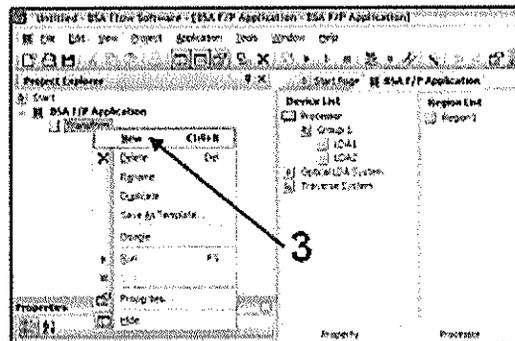
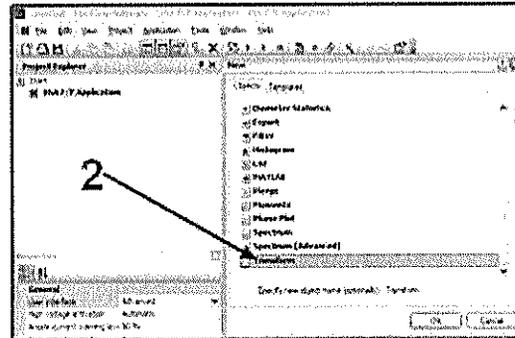
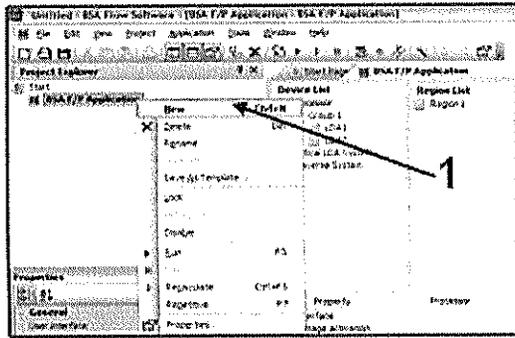
1. Seleccione LDA1.
2. En propiedades poner el centro de velocidad en cero.
3. Finalmente cambie el límite máximo de velocidad para la pruebas.

Nota:

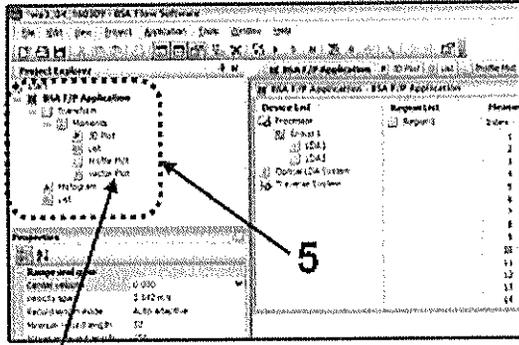
De la misma forma se procede con el otro par de rayos, LDA

Parámetros de visualización en pantalla para la obtención de resultados.

1. Ubique el cursor en "BSA F/P Application", y con el botón derecho del ratón seleccione "New".
2. En el cuadro de diálogo "New" escoja "Transform" y seleccione OK.
3. Ubique el cursor en el nuevo ícono que aparece con el nombre "Transform", y con el botón derecho del mouse seleccione "New".
4. En el nuevo cuadro de dialogo seleccione "3D Plot", y seleccione "OK". Realice el paso 3 hasta completar todos los parámetros de visualización y obtención de los resultados requeridos.



5. Se puede observar en la figura todos los parámetros indispensables para la visualización y obtención de los resultados.

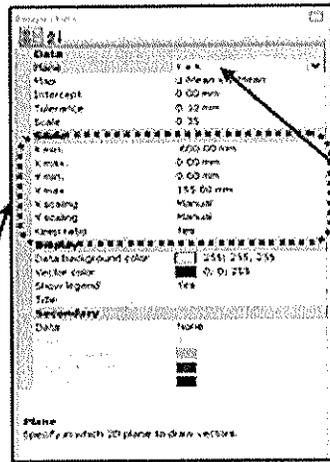


Nota:

Para mayor información sobre los parámetros seleccionados en estos pasos se puede revisar el manual del BSA Flow Software, referencia [11].

Ubicar el sistema de referencia en pantalla.

Anteriormente se explicó cómo se adapta el sistema de referencia al canal de circulación, ahora se procede a definir el sistema de referencia.



8. En la opción "Scale", definir los límites de las fronteras del campo de velocidad a medirse.

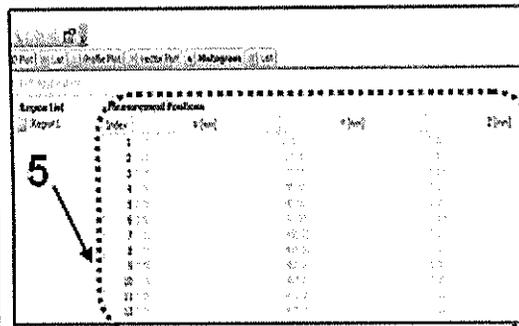
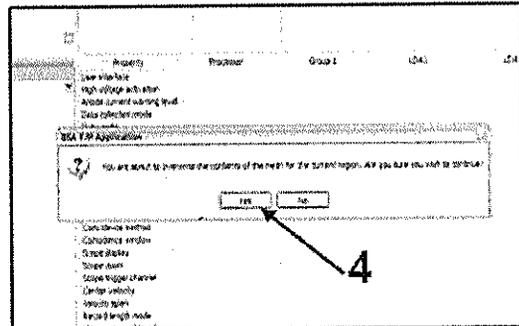
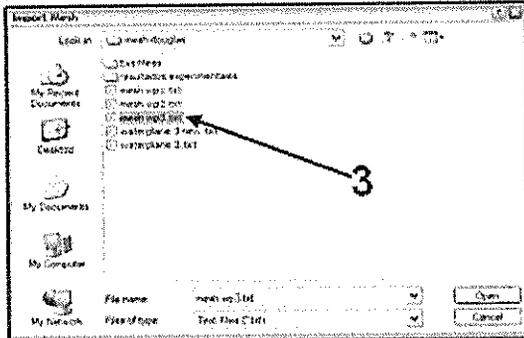
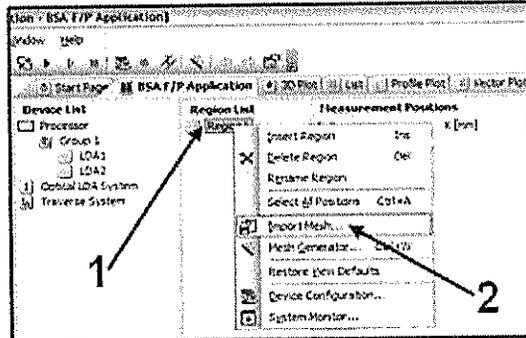
6. Seleccione "Vector Plot".

7. En la opción "Plane", cambie el sistema de referencia a Y x X.

Importando las coordenadas de la mallas al software mediante archivo Txt.

Esta opción se aplica cuando se ha elaborado una tabla de puntos en un archivo Txt, de lo contrario se utilizará el "Mesh Generator" para generar directamente las coordenadas para las mediciones.

1. Seleccione con el cursor "Region 1" y cliquee el botón derecho del mouse para activar la lista de opciones.
2. Escoja la opción "Import Mesh...".
3. Seleccione el archivo que contiene la tabla de puntos de las coordenadas de la malla para la medición en cada punto.

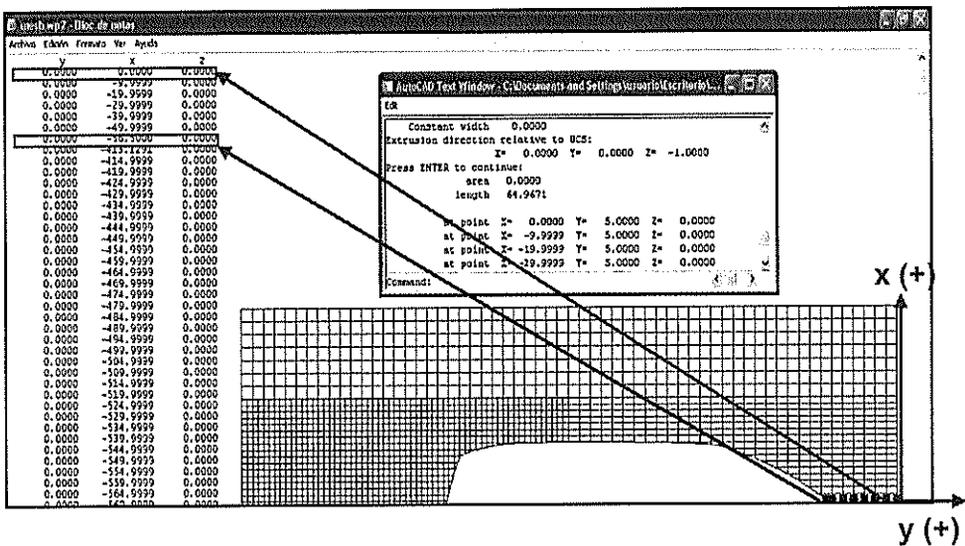


4. Escoja la opción "Yes" para aceptar la importación de la tabla de puntos mediante el archivo con extensión Txt.

5. Muestra la tabla de puntos importados en pantalla.

El proceso de preparación del archivo Txt, que contiene la información de las coordenadas que permitirán obtener la velocidad en cada punto de la malla, se describe a continuación. Las geometrías pueden elaborarse con el software de graficación AutoCAD. Para obtener las coordenadas de cada punto de la malla se utiliza el comando "LIST", señalando la Polilínea y tecleando "Enter", aparecerá el cuadro de diálogo que contiene la información requerida como se observa en la figura A6. Finalmente estos puntos son copiados a un bloc de notas y grabados en un archivo txt, para su importación desde el paquete BSA Flow.

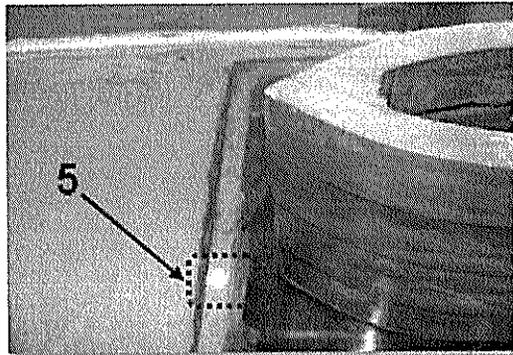
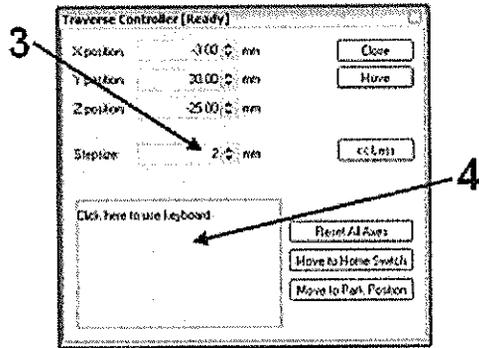
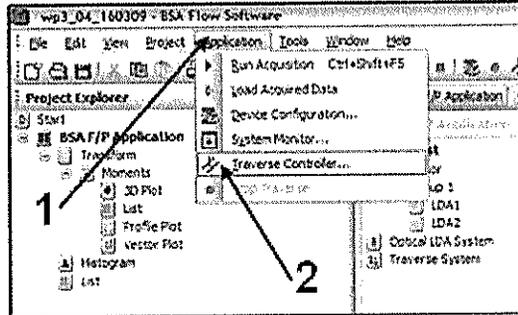
Elaboración del archivo Txt para la importación al BSA Flow Software.



Ajustando el origen del Robot para las mediciones experimentales utilizando la técnica LDA.

Este paso es muy importante, ya que se debe ubicar el origen del sistema de referencia del robot para la ubicación en la posición correcta en cada punto de la malla elaborada.

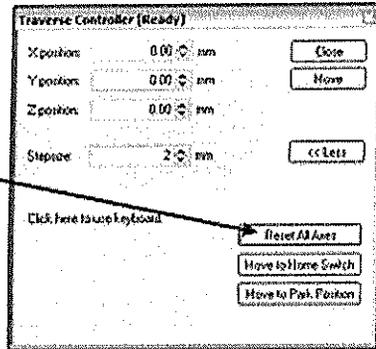
1. Del menú principal escoja "Application".
2. De la lista desplegable escoja "Traverse Controller".
3. En el cuadro que aparece como el controlador del robot en "Stepsize" escribir el tamaño de paso para el movimiento del robot.
4. Activar el "Keyboard" para utilizar los controladores de movimiento en el teclado.
5. Obsérvese que el laser se encuentre en el origen requerido para las pruebas.



6. Finalmente se debe encerrar el robot con la opción "Reset All Axes"

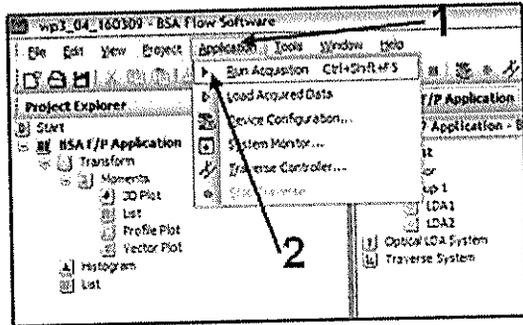
Nótese que en el cuadro aparece las opciones "Move to Home Switch", que sirve para llevar el sistema de coordenadas al sistema local original del robot. Mientras que "Move To Park Position", indica que la probeta es trasladada al último sistema de referencia escogido por el usuario para las mediciones.

6



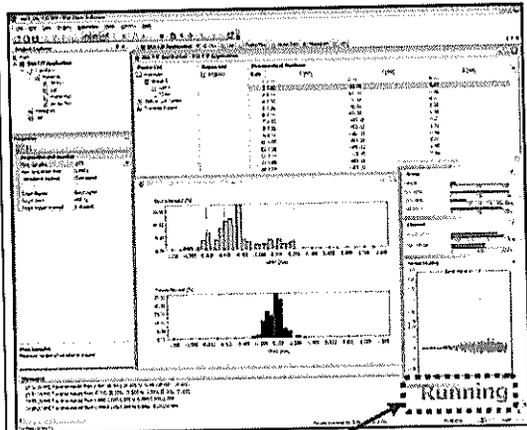
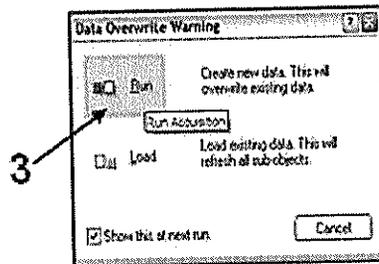
Ejecución del software para la obtención de los resultados experimentales.

Existe dos formas para la ejecución del programa, la primera es mediante el comando "Application" del menú principal, y la otra forma es seleccionando directamente el icono  de la barra de herramientas.



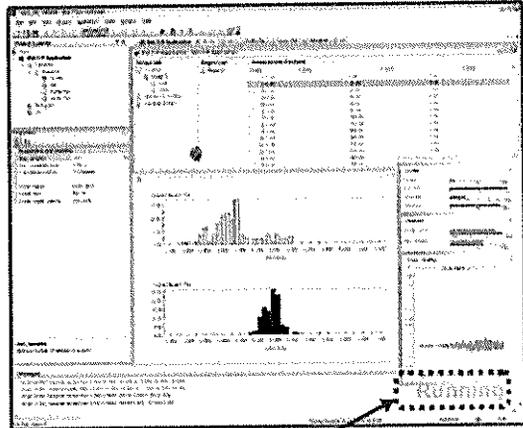
Ejecutando el programa:

1. Del menú principal escoja "Application"
2. De la lista desplegable escoja "Run Acquisition".
3. En el cuadro de dialogo seleccione "Run".
4. En el nuevo cuadro de diálogo que aparece haga click en "Acquire".
5. Finalmente obsérvese que el programa se ejecuta mediante "Running".



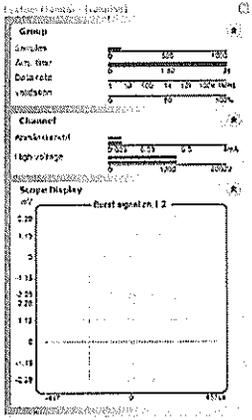
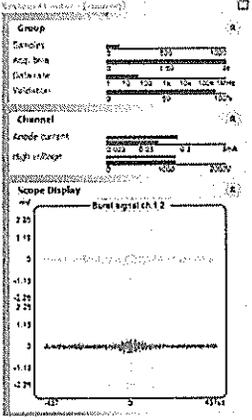
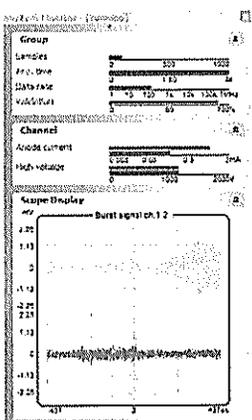
Nota:

Si en "Message" del programa en la parte inferior izquierda de la pantalla aparece "Emergency stop or limit switch encountered. Code: '2'", indica que el robot sobrepasó la distancia límite requerida, o simplemente es un error al inicio de la ejecución. Para solucionar este problema se debe apagar y luego encender el controlador del robot.



5

Manipulando el controlador de señal para la obtención buena recepción de señal en Pantalla.

 <p>Function: Group - [unavailable]</p> <p>Group</p> <table border="1"> <tr><td>Amplitude</td><td>0</td><td>500</td><td>1000</td></tr> <tr><td>Auto. bias</td><td>0</td><td>1.00</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>Data rate</td><td>1</td><td>10</td><td>100</td><td>1k</td><td>10k</td><td>100k</td><td>1M</td></tr> <tr><td>Video rate</td><td>0</td><td>60</td><td>700</td></tr> </table> <p>Channel</p> <p>Amplitude</p>	Amplitude	0	500	1000	Auto. bias	0	1.00	2.00	Data rate	1	10	100	1k	10k	100k	1M	Video rate	0	60	700	0.00	0.50	0.5	1mA
Amplitude	0	500	1000																					
Auto. bias	0	1.00	2.00																					
Data rate	1	10	100	1k	10k	100k	1M																	
Video rate	0	60	700																					
 <p>Function: Group - [unavailable]</p> <p>Group</p> <table border="1"> <tr><td>Amplitude</td><td>0</td><td>500</td><td>1000</td></tr> <tr><td>Auto. bias</td><td>0</td><td>1.00</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>Data rate</td><td>1</td><td>10</td><td>100</td><td>1k</td><td>10k</td><td>100k</td><td>1M</td></tr> <tr><td>Video rate</td><td>0</td><td>60</td><td>700</td></tr> </table> <p>Channel</p> <p>Amplitude</p>	Amplitude	0	500	1000	Auto. bias	0	1.00	2.00	Data rate	1	10	100	1k	10k	100k	1M	Video rate	0	60	700	0.00	0.50	0.5	1mA
Amplitude	0	500	1000																					
Auto. bias	0	1.00	2.00																					
Data rate	1	10	100	1k	10k	100k	1M																	
Video rate	0	60	700																					
 <p>Function: Group - [unavailable]</p> <p>Group</p> <table border="1"> <tr><td>Amplitude</td><td>0</td><td>500</td><td>1000</td></tr> <tr><td>Auto. bias</td><td>0</td><td>1.00</td><td>2.00</td></tr> <tr><td>Data rate</td><td>1</td><td>10</td><td>100</td><td>1k</td><td>10k</td><td>100k</td><td>1M</td></tr> <tr><td>Video rate</td><td>0</td><td>60</td><td>700</td></tr> </table> <p>Channel</p> <p>Amplitude</p>	Amplitude	0	500	1000	Auto. bias	0	1.00	2.00	Data rate	1	10	100	1k	10k	100k	1M	Video rate	0	60	700	0.00	0.50	0.5	1mA
Amplitude	0	500	1000																					
Auto. bias	0	1.00	2.00																					
Data rate	1	10	100	1k	10k	100k	1M																	
Video rate	0	60	700																					

Una vez que el programa comienza a ejecutarse, se debe observar la recepción de señal en pantalla en el cuadro de diálogo "System Monitor" como se observa en la parte izquierda de la figura A9. En la parte derecha de la figura A9 se observan los dispositivos de manipulación del controlador de señal.

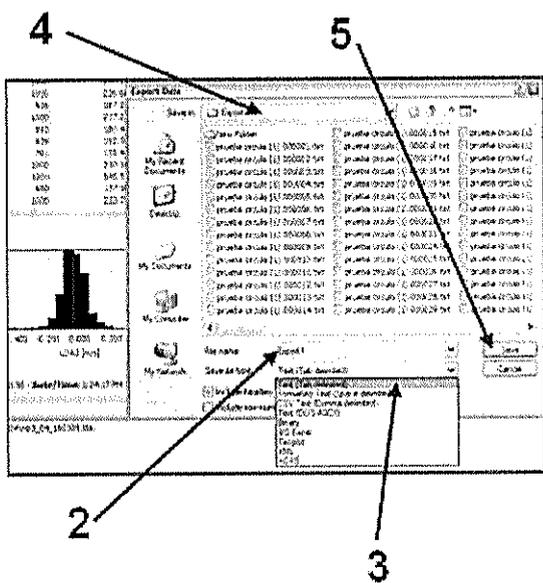
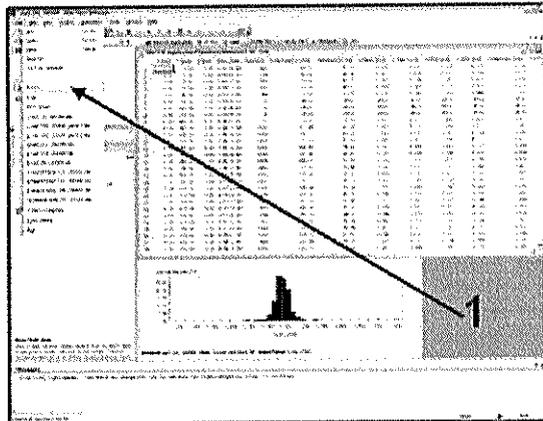
El cuadro de diálogo permite observar la recepción de señal, mediante un parámetro de gran importancia denominado "Validation", el cual se mide en porcentaje. El 100%, indica que hay buena recepción de señal y el programa captura el valor de la velocidad dado en un punto de la malla, lo contrario se observa cuando se tiene 0% de validación. Con un 50% de validación el usuario se asegura tener buena adquisición de datos.

En la grafica (a) se puede observar que el dispositivo de la opción "Discharge" se encuentra en "off", esto indica que no se está permitiendo receptor señal alguna, y la validación es el 0%. En las gráficas (b) y (c) el controlador de señal se encuentra en funcionamiento, y para buscar buena recepción de señal se debe manipular los dispositivos "Current ADJ" y "Power ADJ", como se observa en la grafica (c). Finalmente nótese en "Scope Display" del cuadro de diálogo de la gráfica (b) que existe buena recepción de señal, debido a que la señal se centra entre las líneas verticales que muestra la señal receptada.

Exportación de datos experimentales obtenidos.

Una vez finalizada la ejecución del programa se puede visualizar las mediciones con la opción "list", que presenta una tabla en donde se presentan los parámetros importantes tales como las velocidades promedio para cada coordenada de la malla, entre otros (ver el manual del programa en las página 5-72). A continuación se presentan los pasos a seguir para la exportación de los resultados obtenidos.

1. Del menú principal en el comando "File" seleccione "Export".
2. En el cuadro de diálogo en "File Name", escriba el nombre del archivo de datos.
3. En "Save as Type", escoja el tipo de archivo, por ejemplo los más conocidos son: Txt, MS Excel, Tecplot.



4. Seleccione "Save in" para guardar el archivo en algún directorio específico.

5. Seleccione "Save" para guardar el archivo de resultados, con la extensión requerida, en el directorio seleccionado por el usuario.

Guardando los proyectos con extensión del programa.

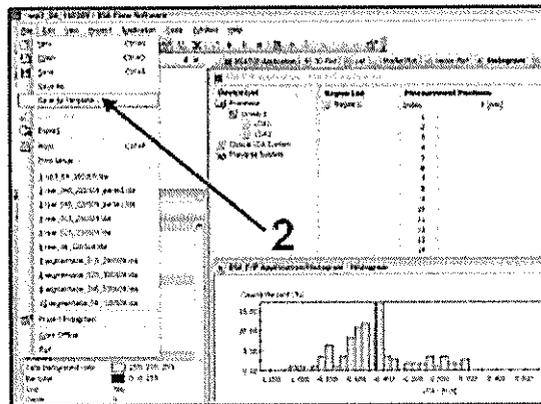
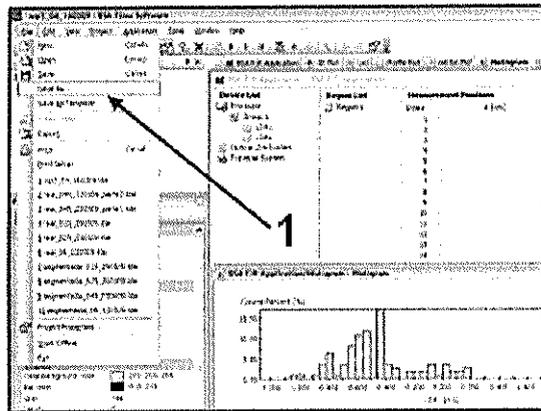
Existen dos formas de guardar los proyectos como se describe a continuación:

La primera forma se guarda en el directorio de proyectos que el programa crea en la instalación.

1. Del menú principal en el comando "File" seleccione "Save As...".

La segunda forma es guardar el proyecto en la página principal del programa

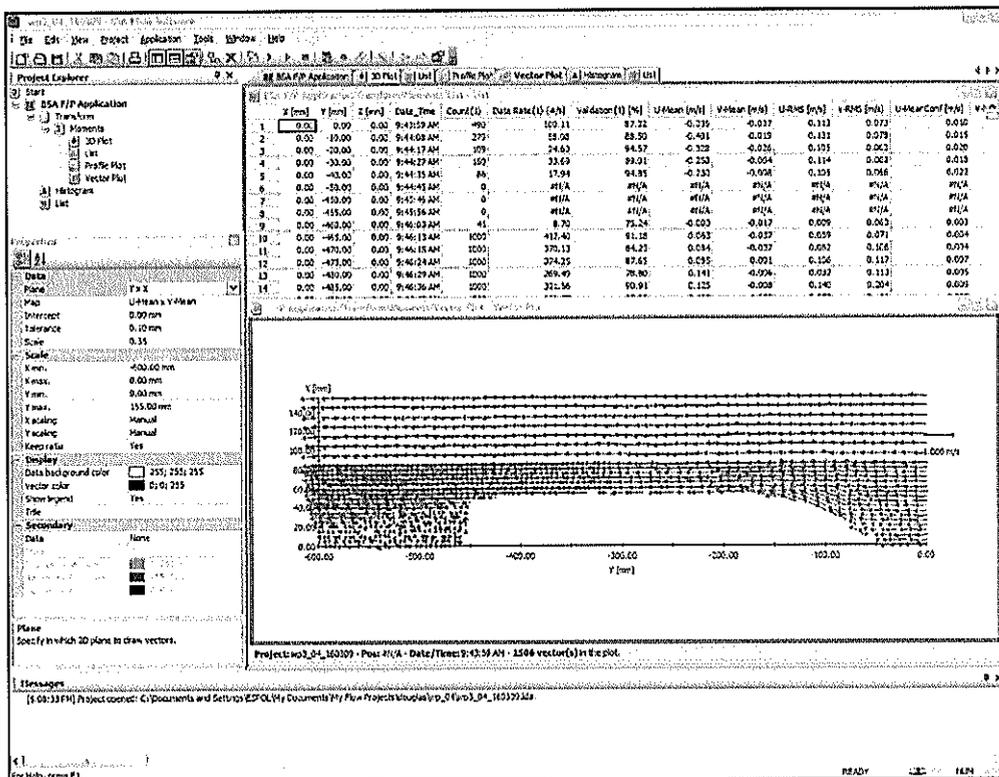
2. Del menú principal en el comando "File" seleccione "Save As Template...".



Todos los pasos anteriores sirven para la elaboración de un proyecto nuevo en general. Si se desea ver los resultados de un proyecto existente, solo se debe abrir el proyecto y luego activar el icono  de la barra de herramientas del programa, para cargar los datos de resultados del proyecto existente. Otra forma de cargar los resultados es seleccionando "Application / Load Acquired Data", del menú principal del programa.

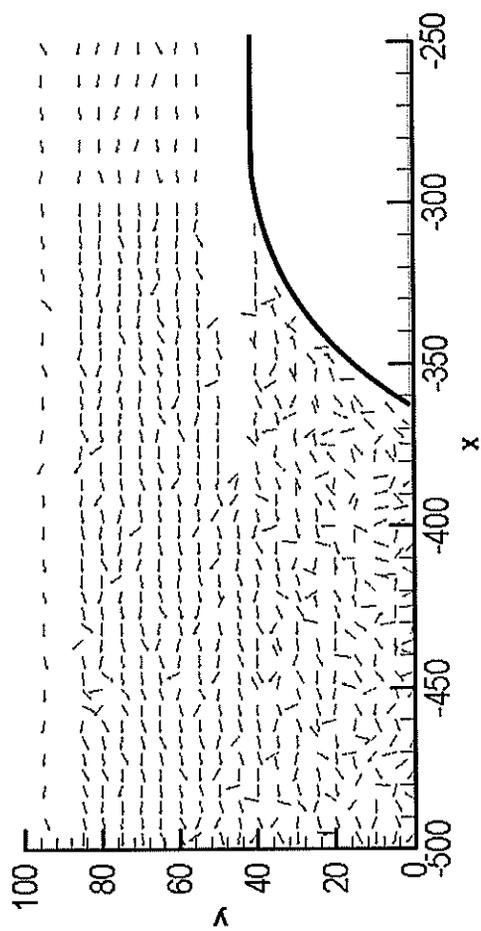
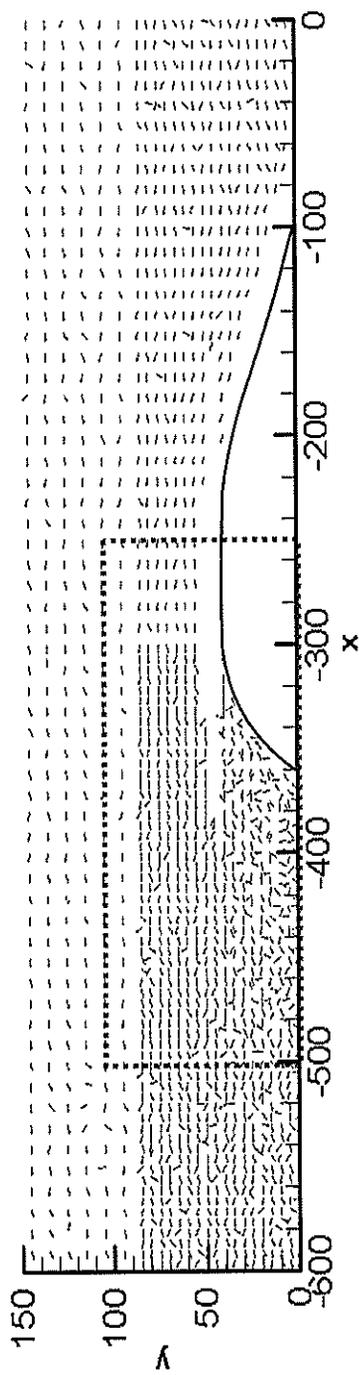
Finalmente los resultados obtenidos de las velocidades en cada punto de la malla mediante la técnica LDA, pueden ser visualizados mediante el comando "Vector Plot" del "BSA F/P Application", como se muestra a continuación en la figura A12.

Visualización de los resultados.

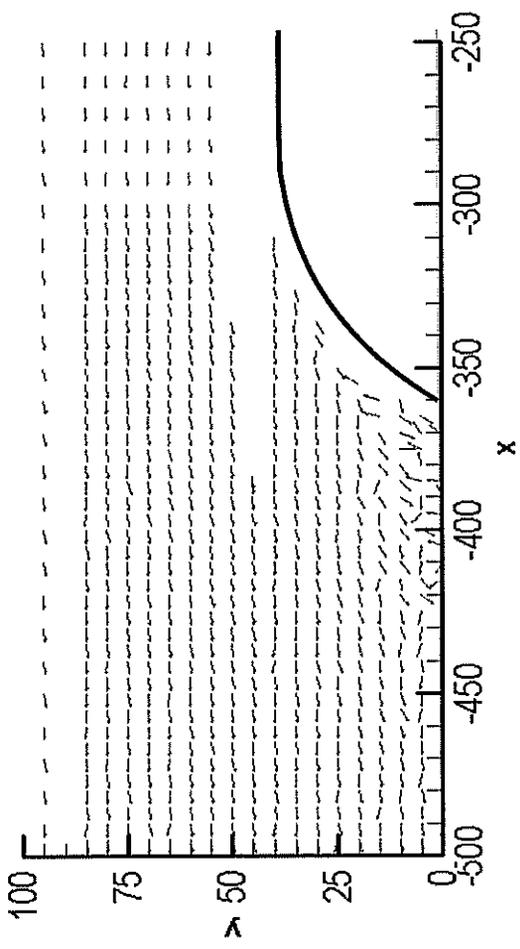
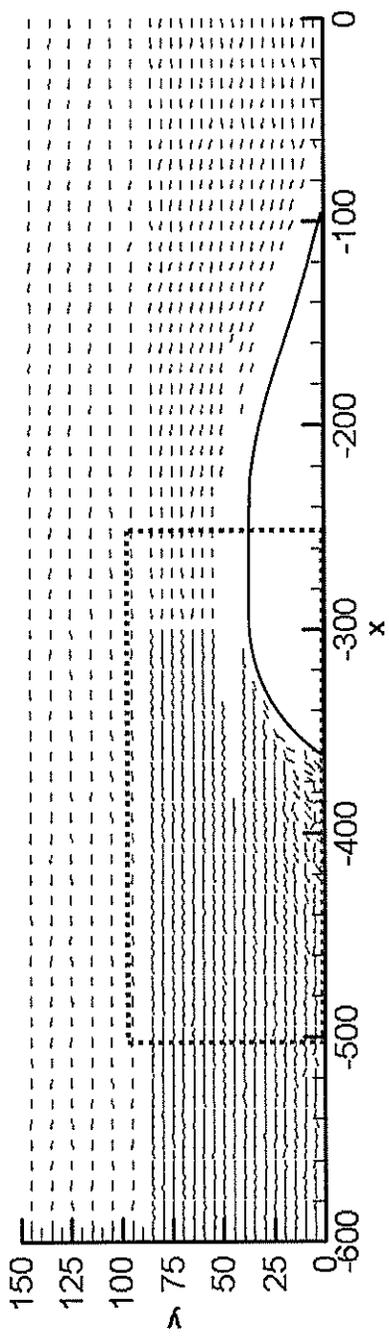


APÉNDICE B

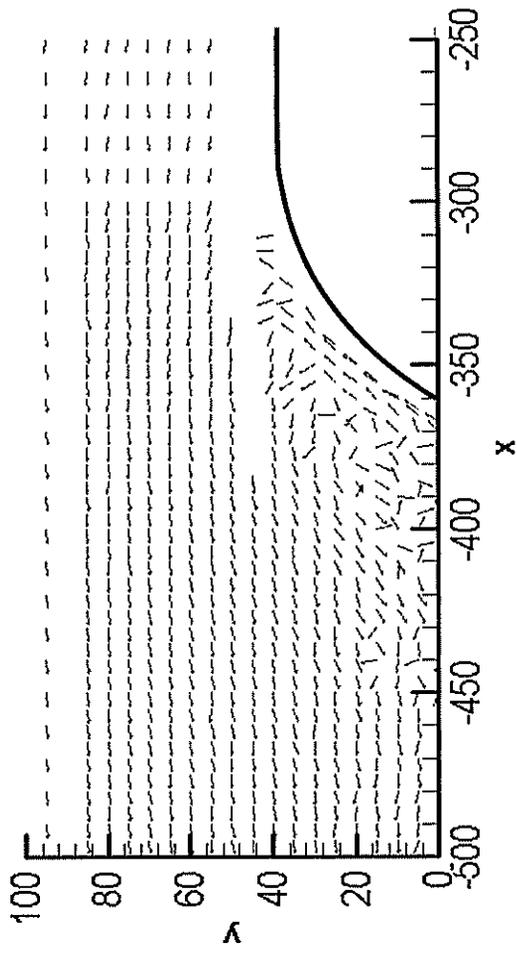
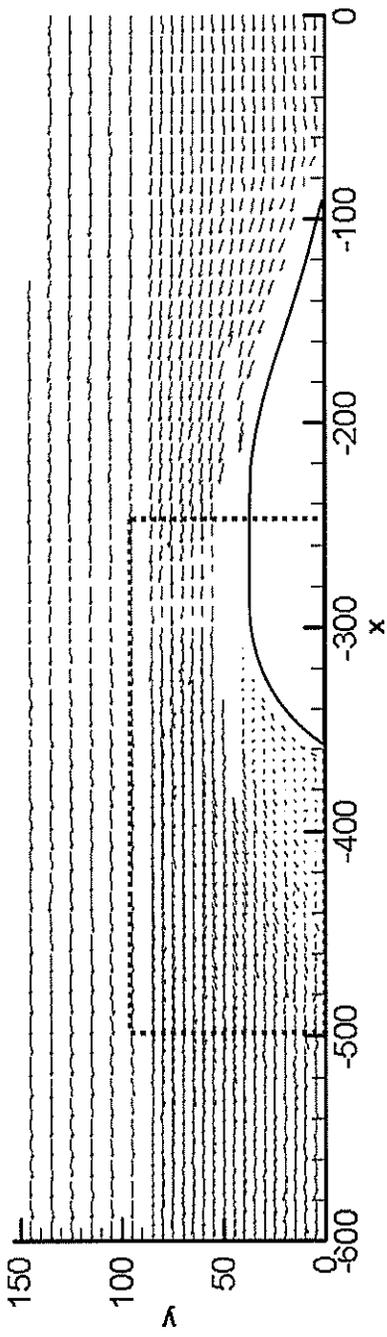
Visualización del Campo de velocidades del Flujo alrededor de los Planos de Flotación WP1, WP2, y WP3, obtenidos experimentalmente.



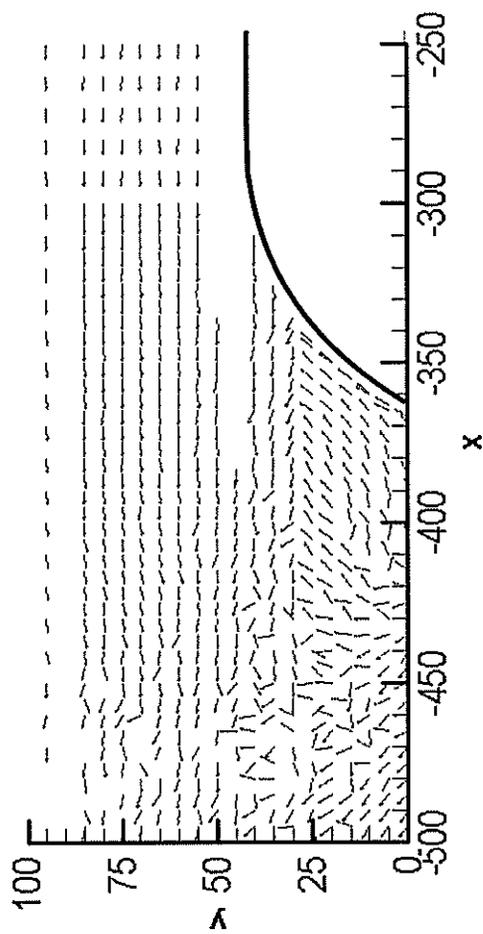
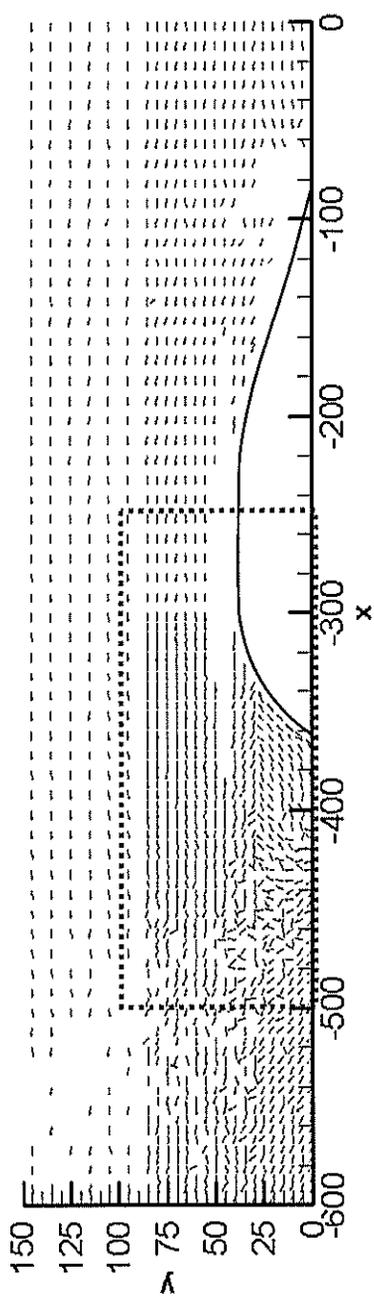
Plano de flotación 1: $U = 0.04$ m/seg.



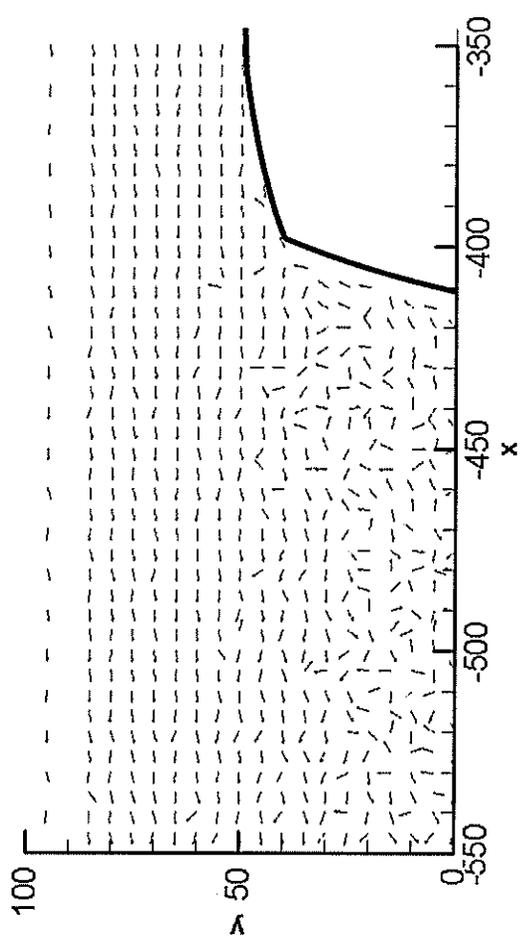
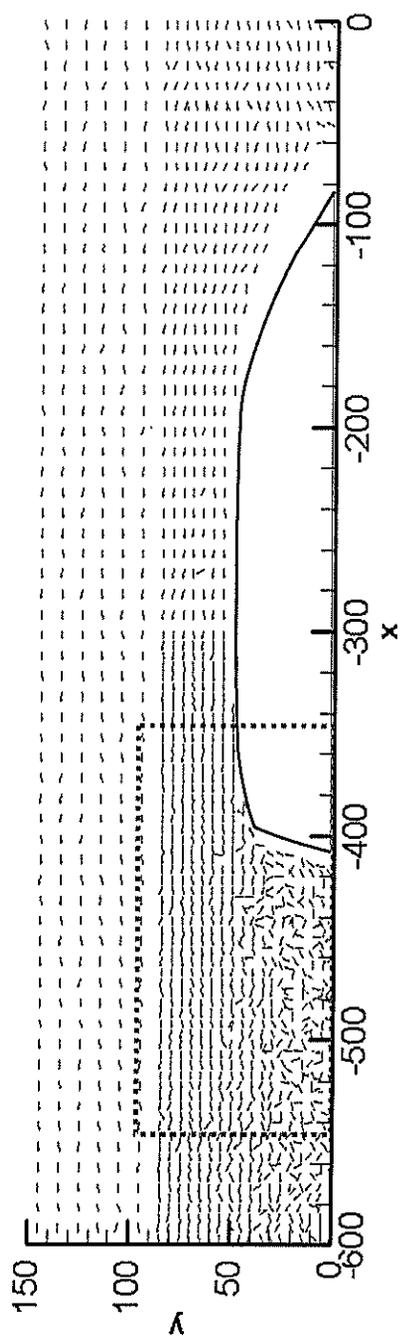
Plano de flotación 1: $U = 0.2$ m/seg.



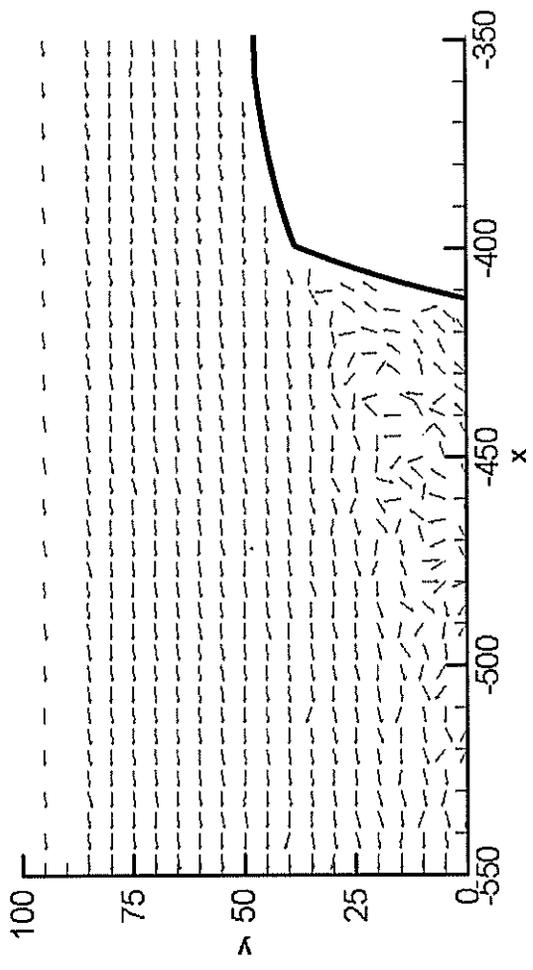
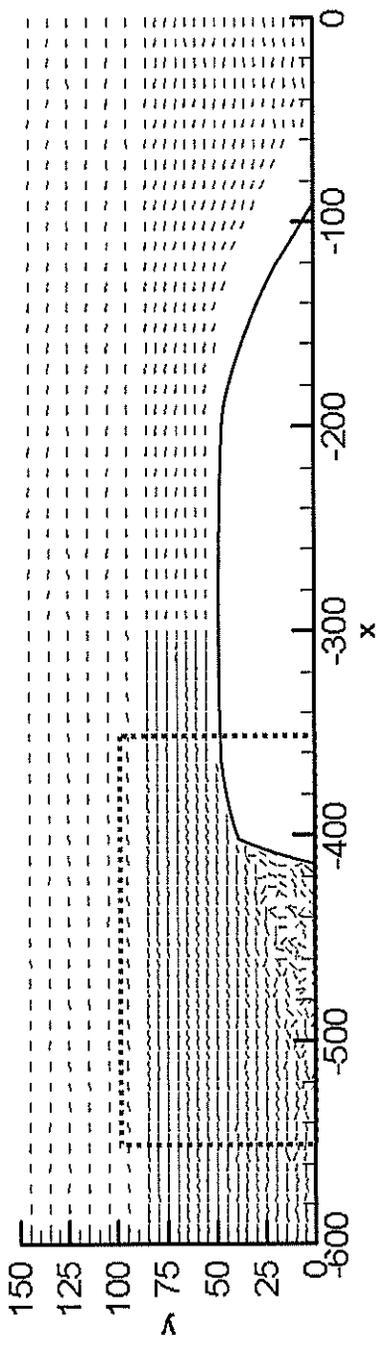
Plano de flotación 1: $U = 0.4$ m/seg



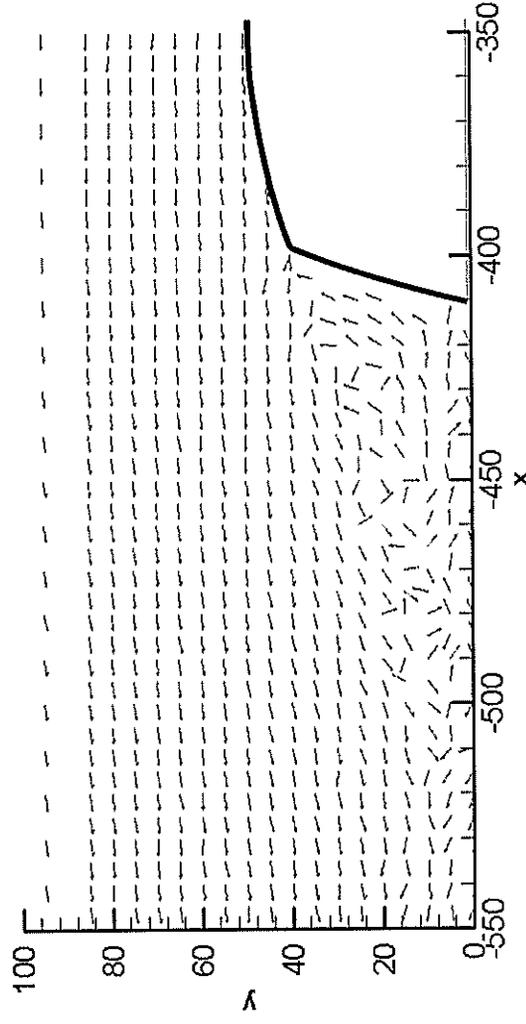
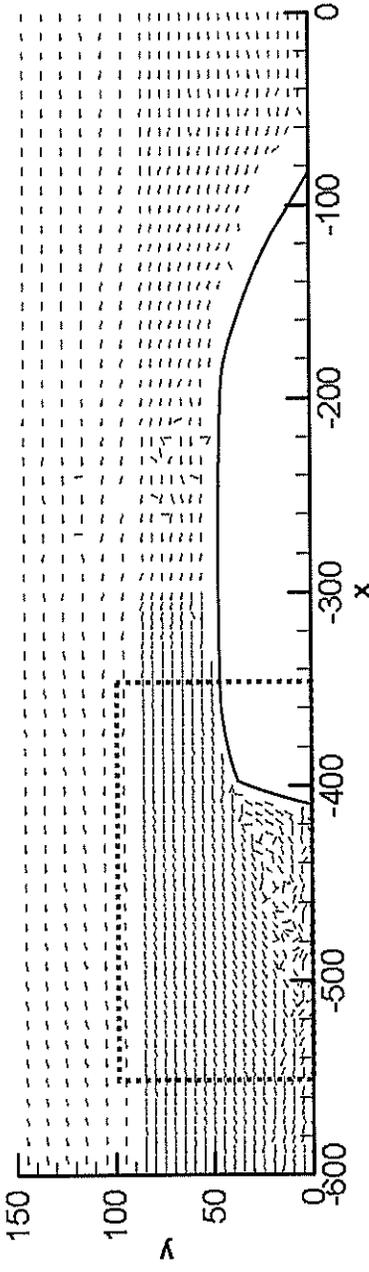
Plano de flotación 1: $U = 0.6$ m/seg.



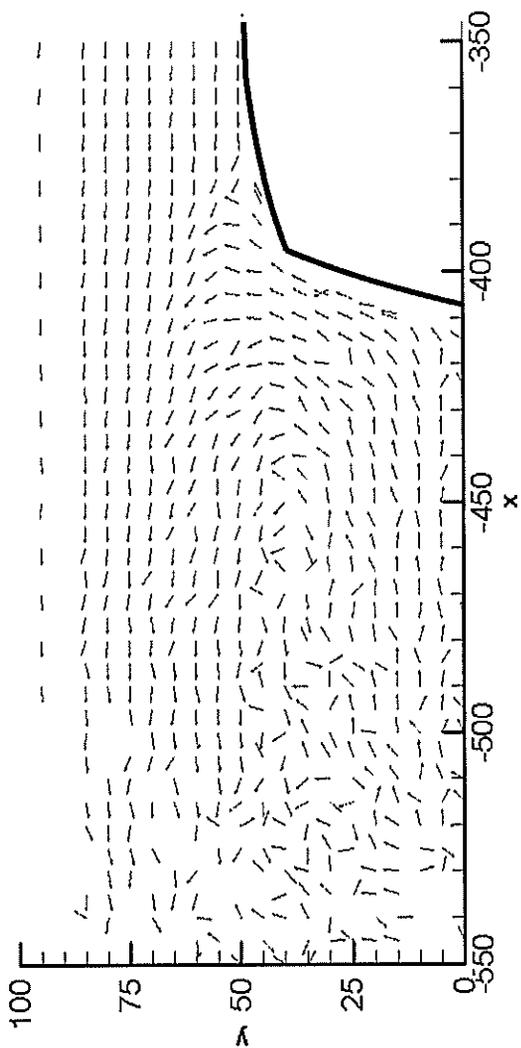
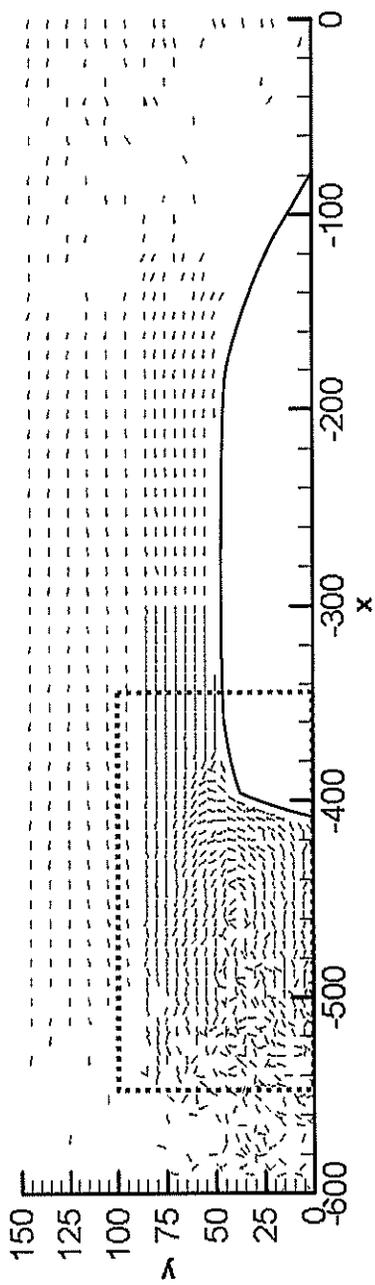
Plano de flotación 2: $U = 0.04$ m/seg.



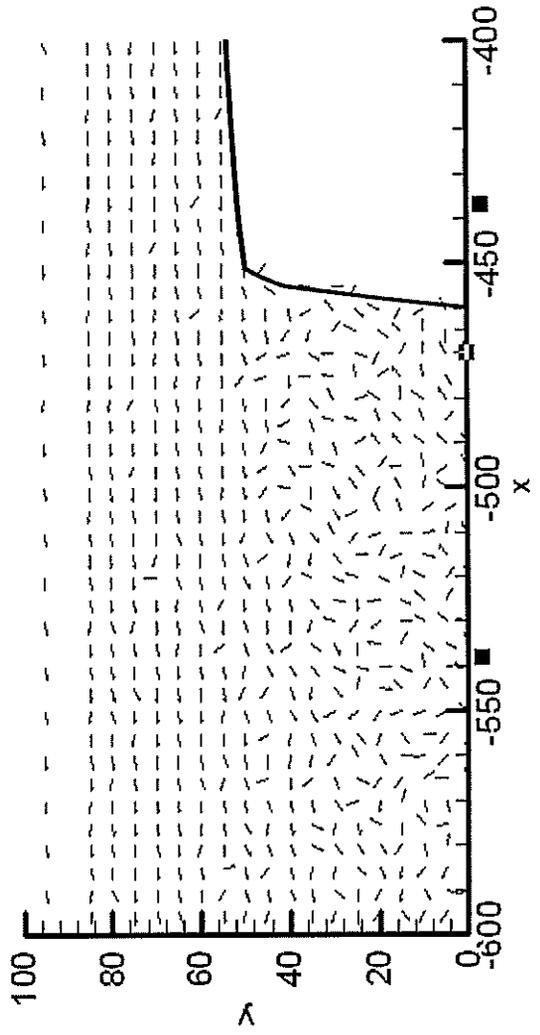
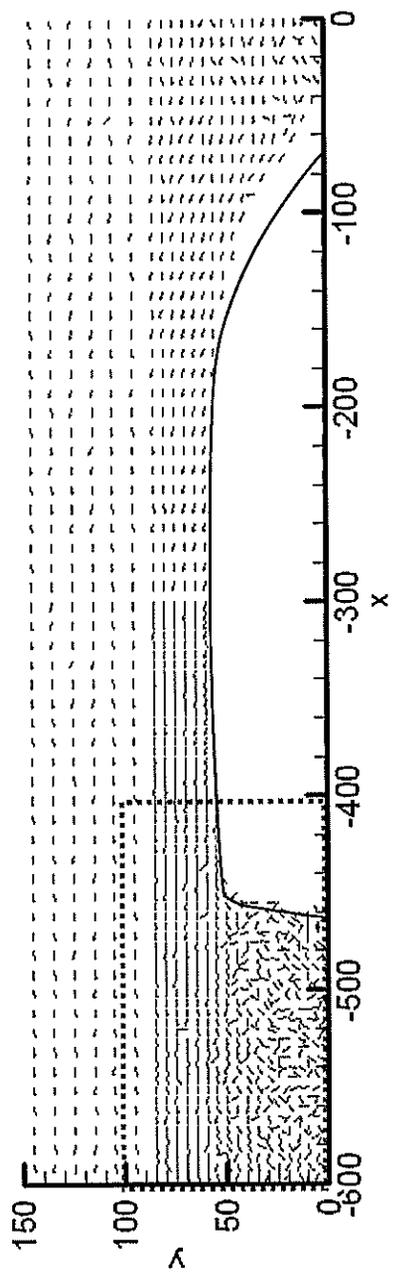
Plano de flotación 2: $U = 0.2$ m/seg.



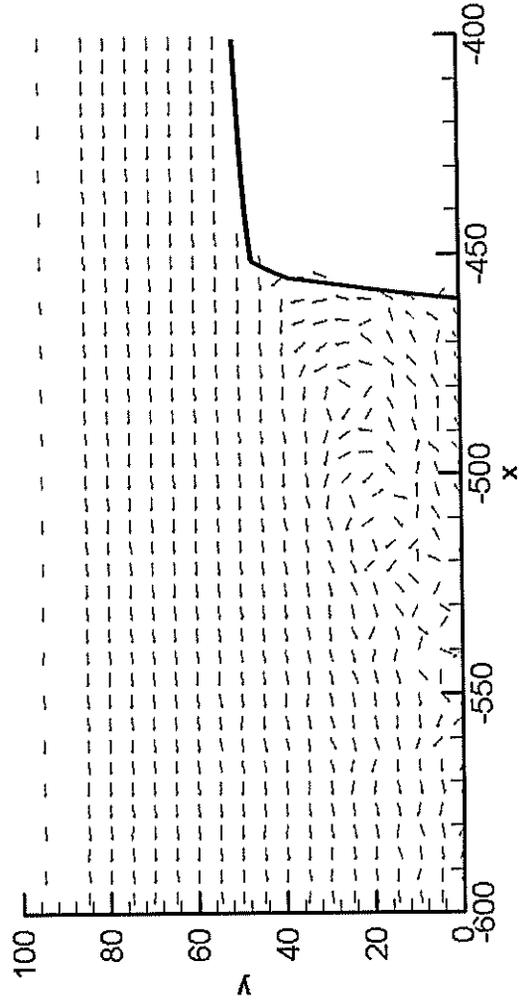
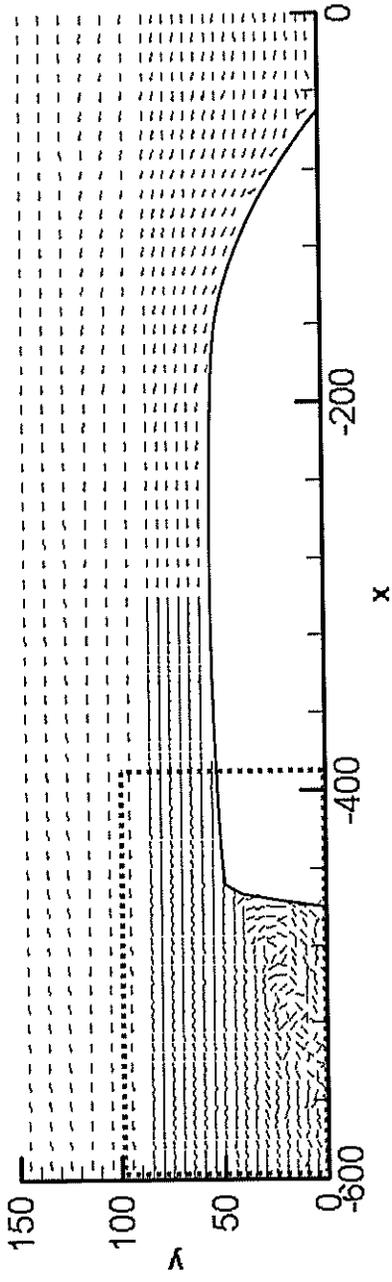
Plano de flotación 2: $U = 0.4$ m/seg.



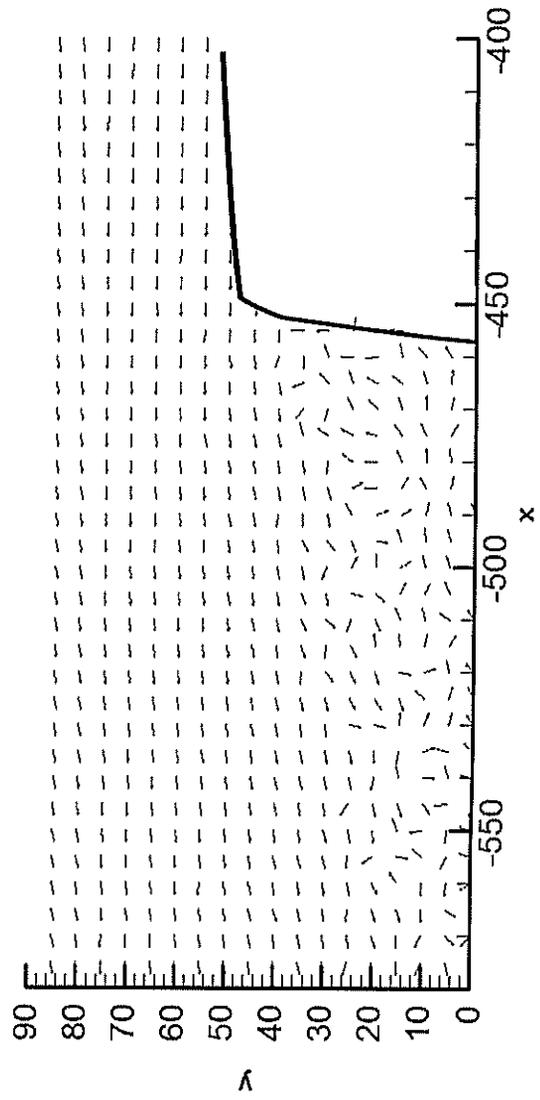
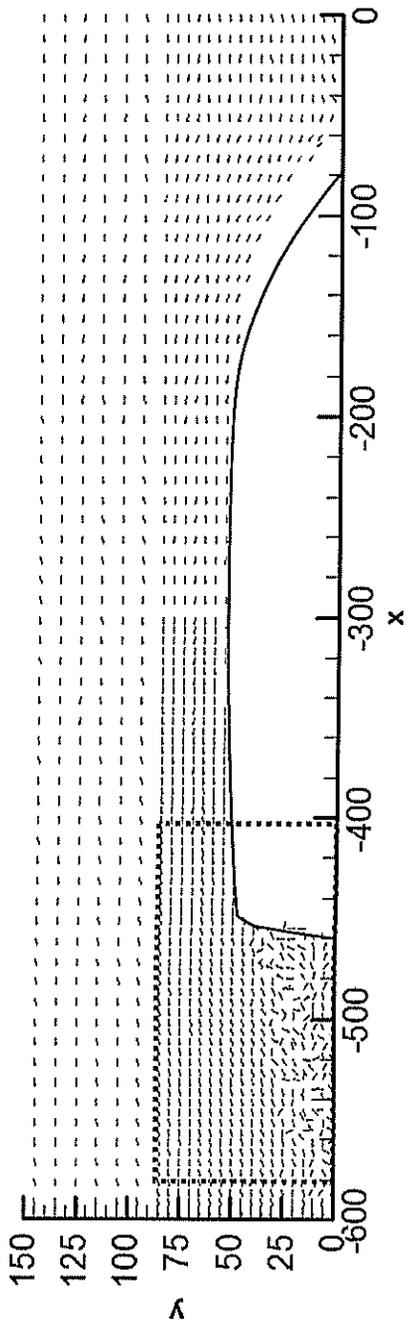
Plano de flotación 2: $U = 0.6$ m/seg.



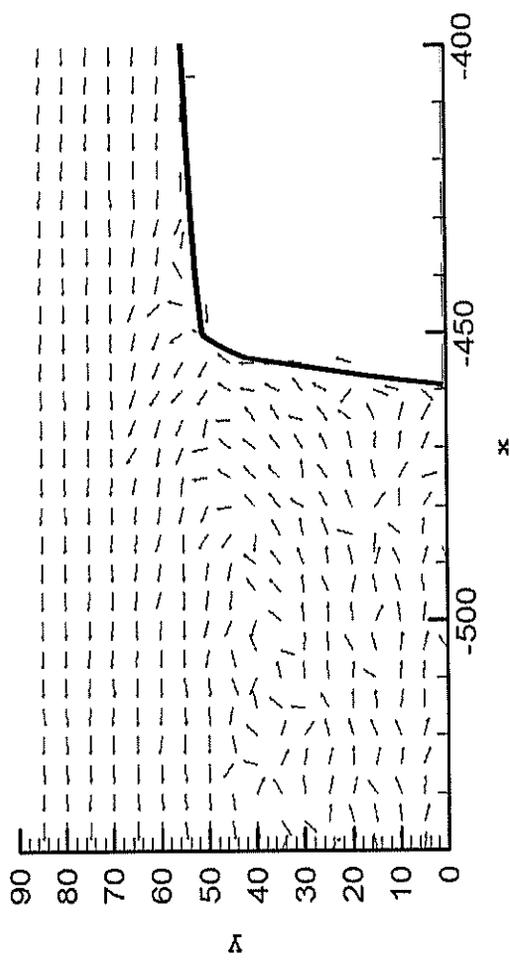
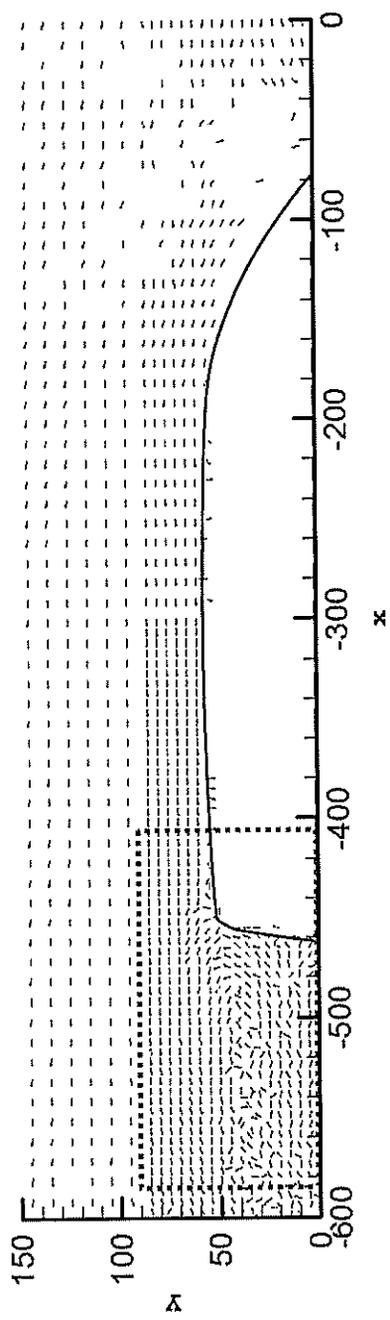
Plano de flotación 3: $U = 0.04$ m/seg.



Plano de flotación 3: $U = 0.2$ m/seg.



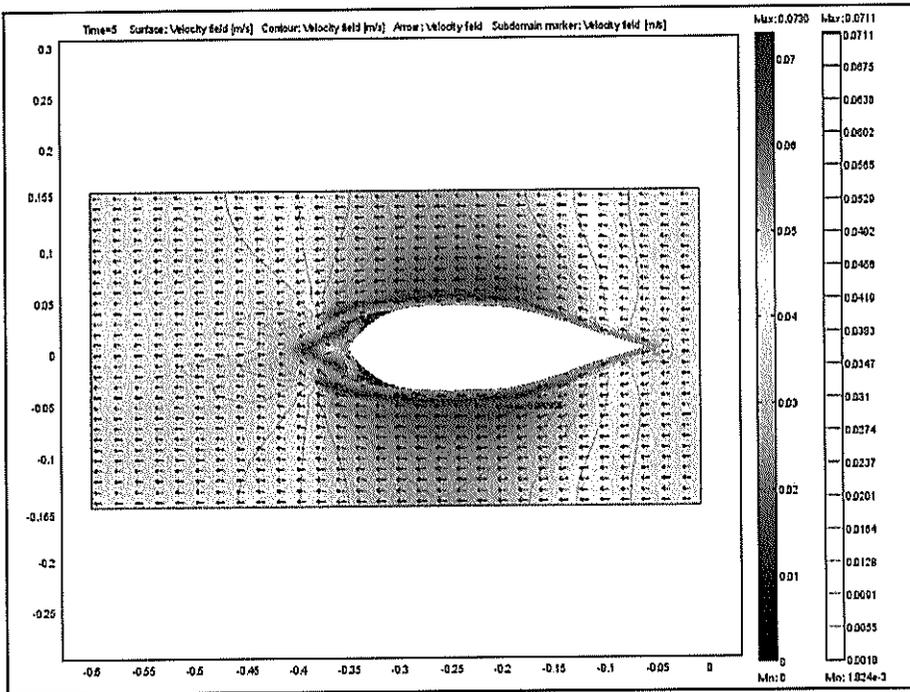
Plano de flotación 3: $U = 0.4$ m/seg.



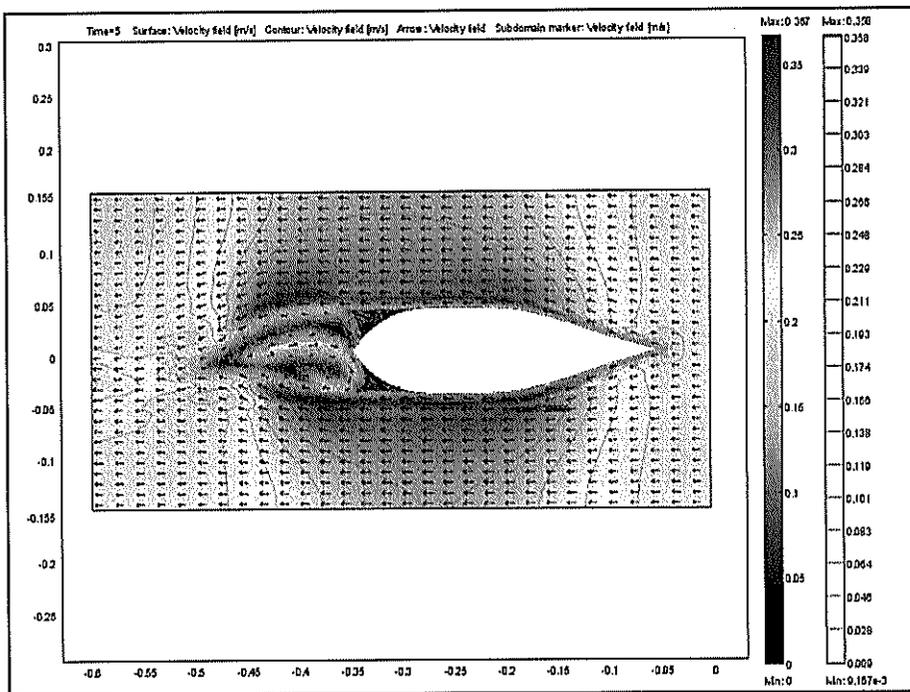
Plano de flotación 3: $U = 0.6$ m/seg.

APÉNDICE C

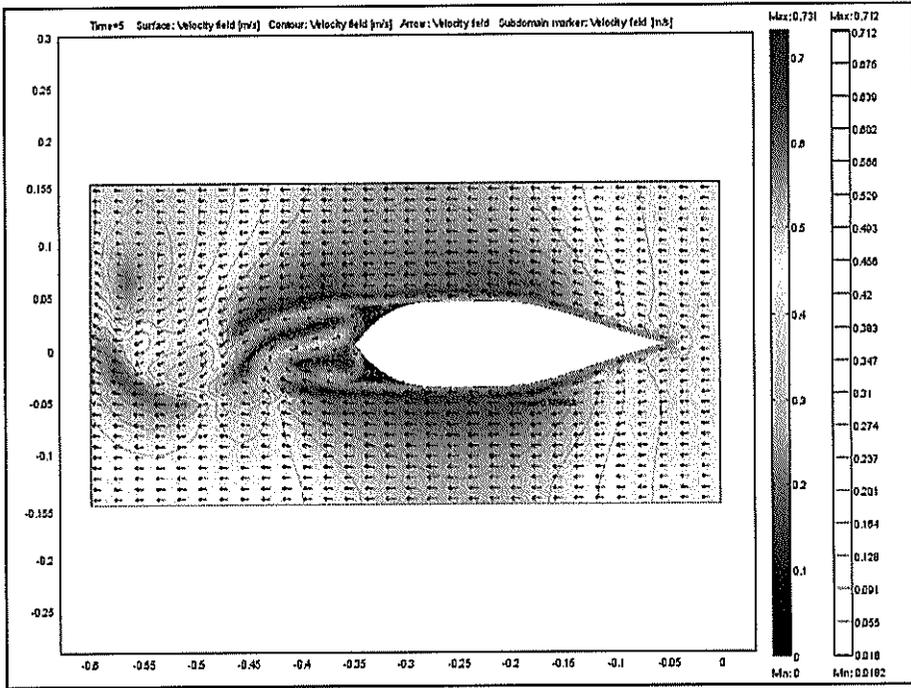
Visualización del Campo de velocidades del Flujo alrededor de los Planos de Flotación WP1, WP2, y WP3, obtenidos Numéricamente.



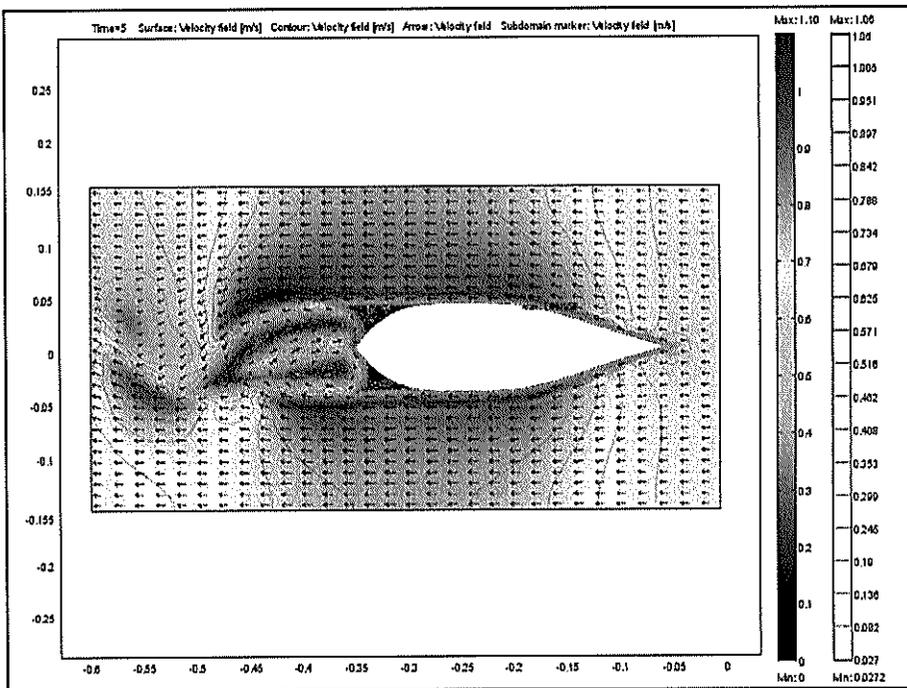
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 1, $U = 0.04$ m/seg.



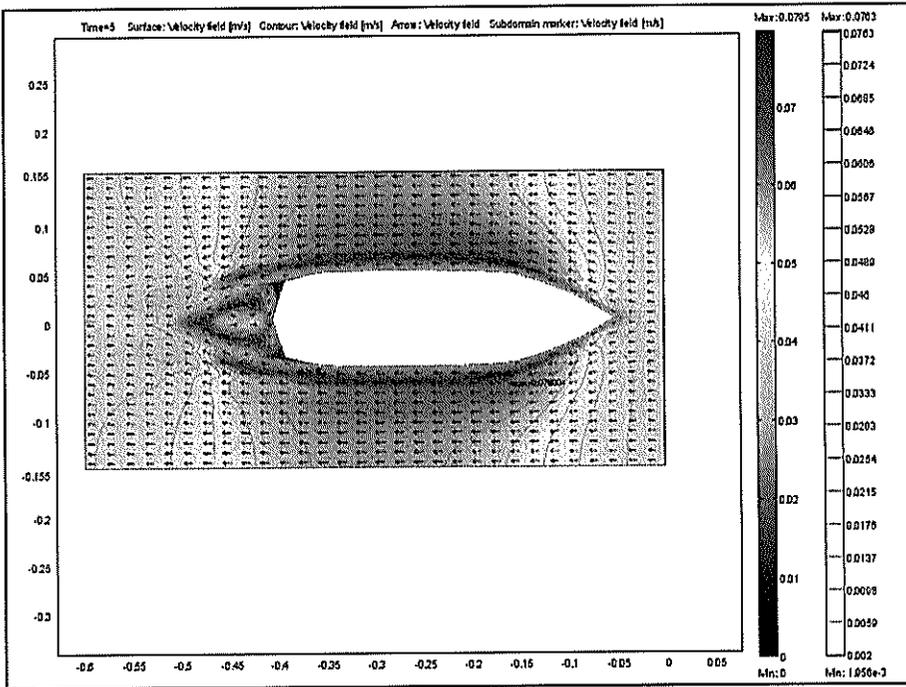
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 1, $U = 0.2$ m/seg.



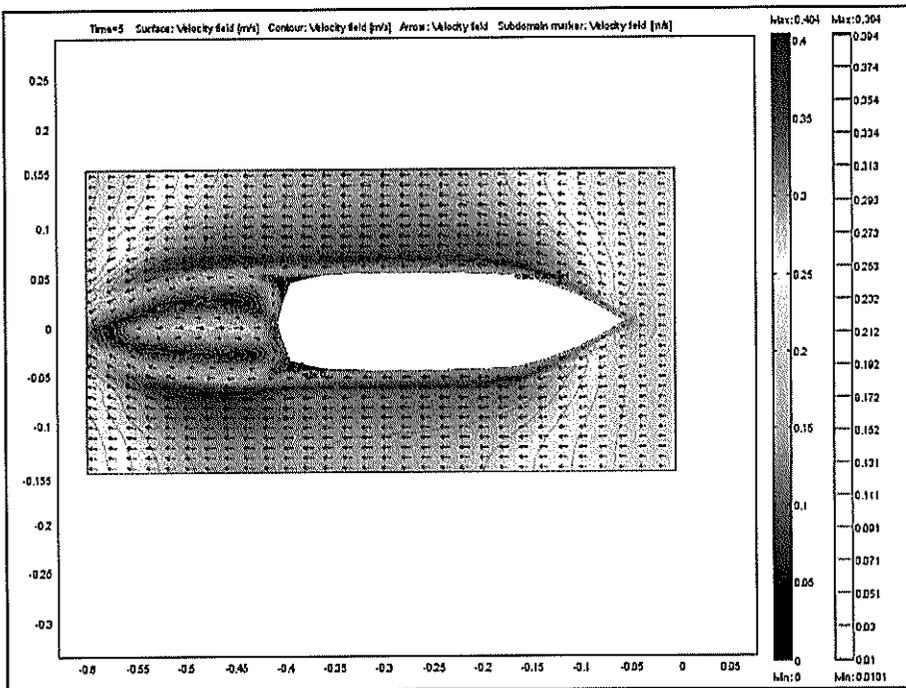
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 1, $U = 0.4$ m/seg.



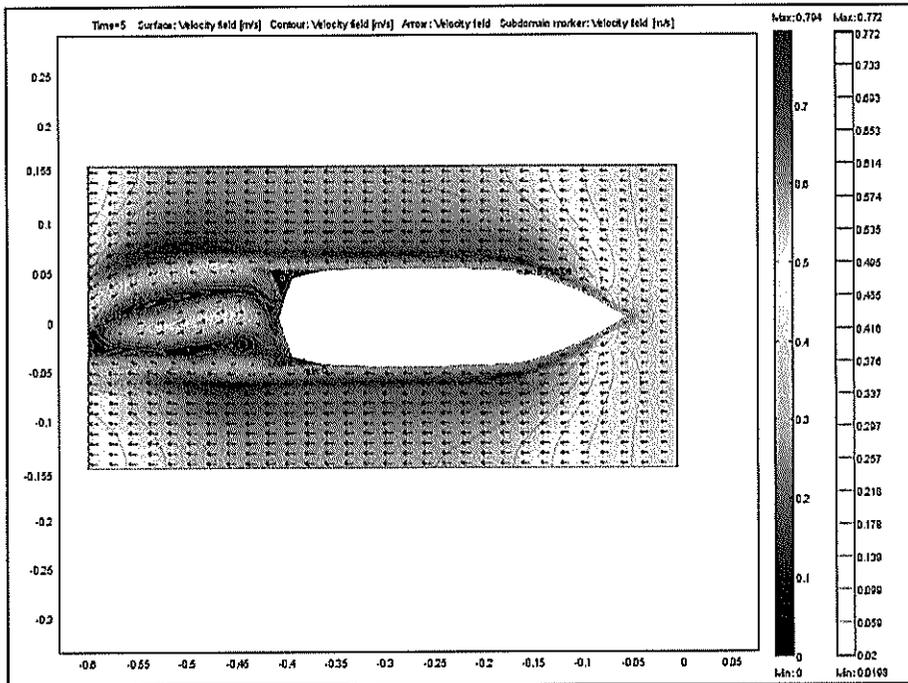
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 1, $U = 0.6$ m/seg.



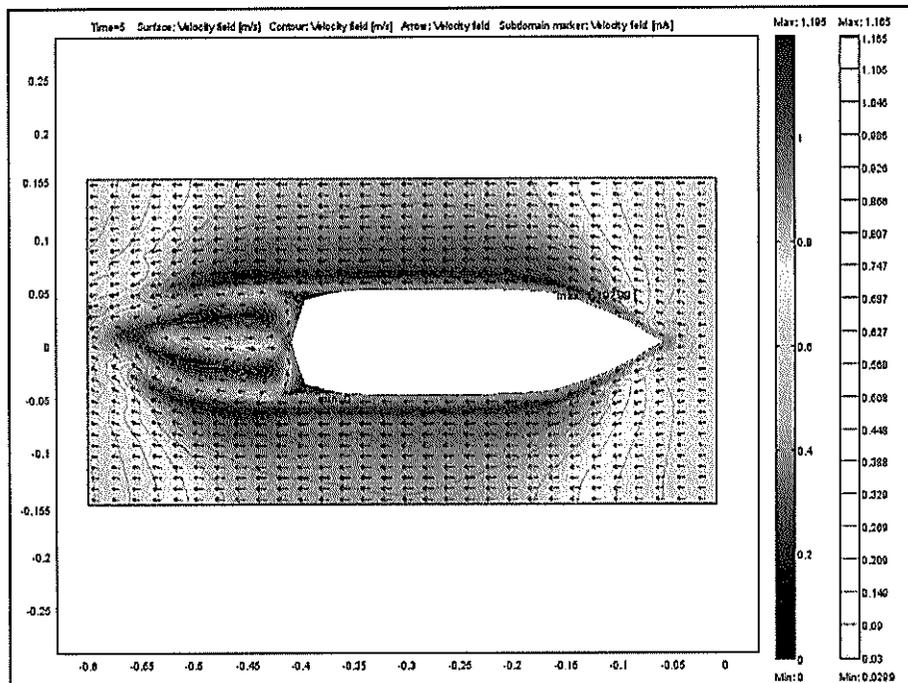
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 2, $U = 0.04$ m/seg.



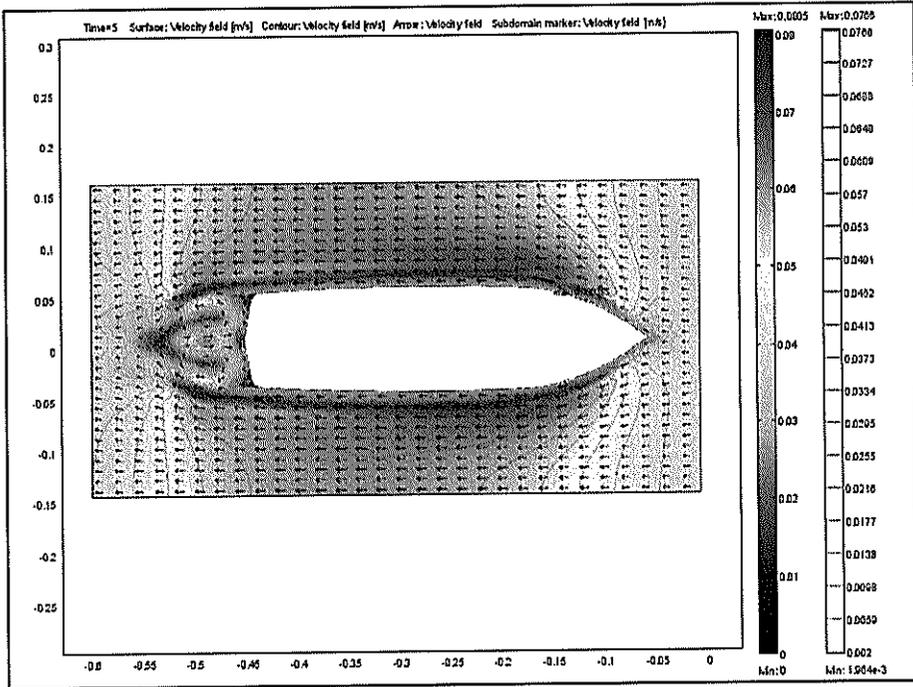
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 2, $U = 0.2$ m/seg.



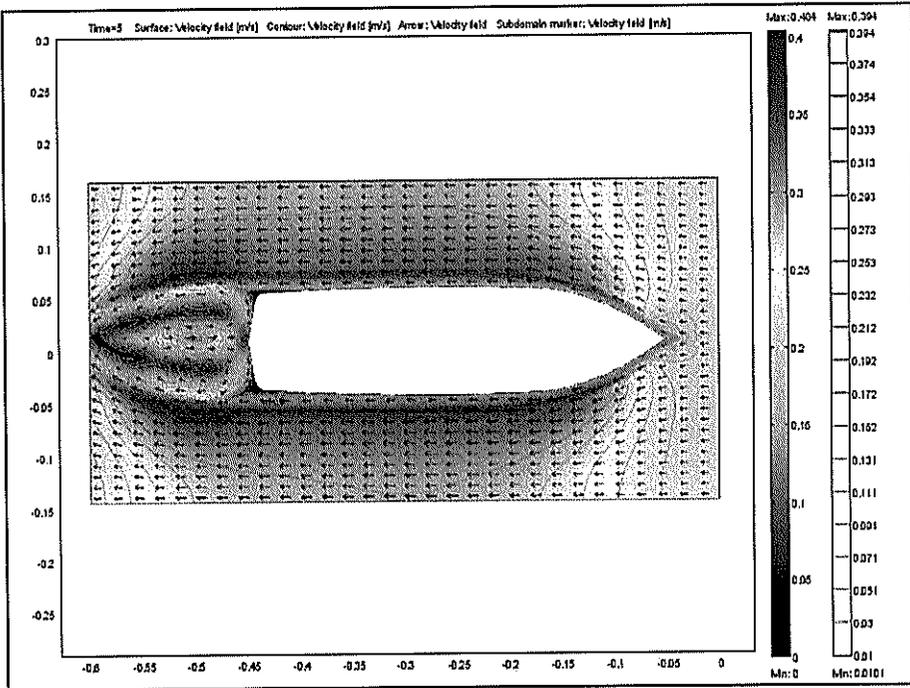
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 2, $U = 0.4$ m/seg.



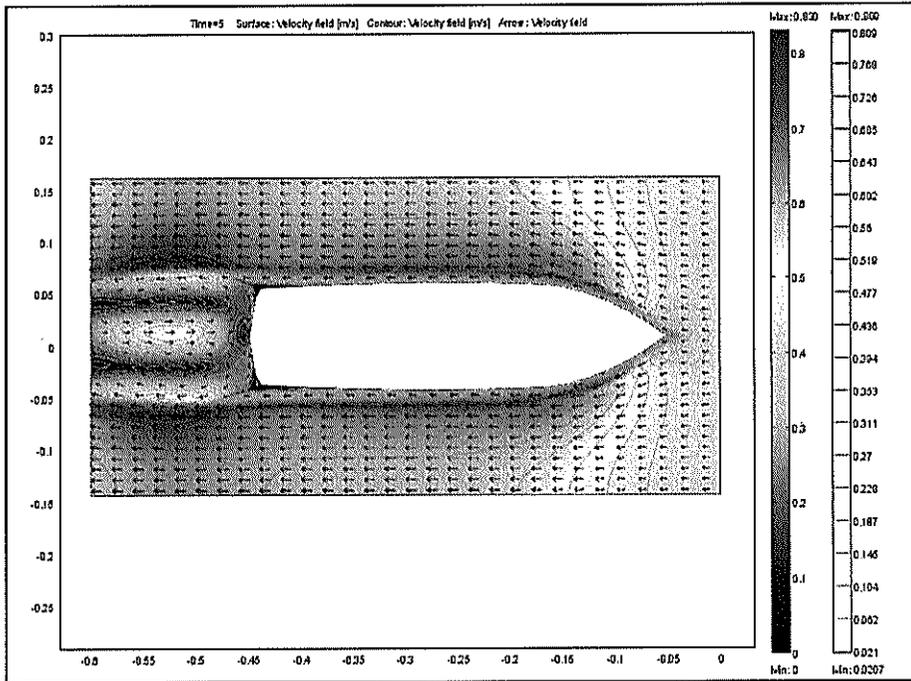
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 2, $U = 0.6$ m/seg.



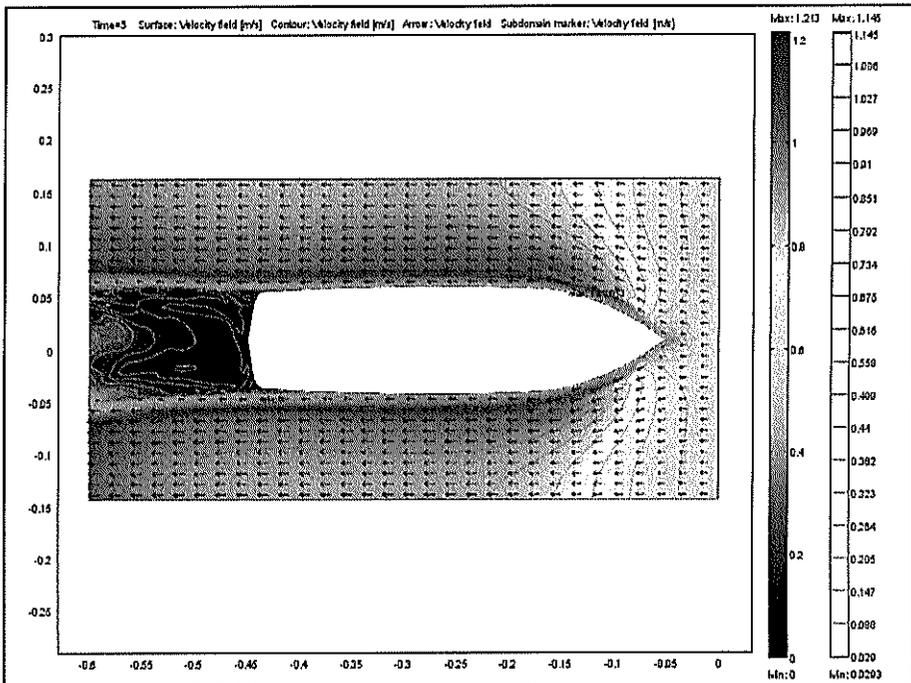
Distribución de Velocidad: Plano de flotación 3, $U = 0.04$ m/seg.



Distribución de Velocidad: Plano de flotación 3, $U = 0.2$ m/seg.



Distribución de Velocidad: Plano de flotación 3, $U = 0.4$ m/seg.

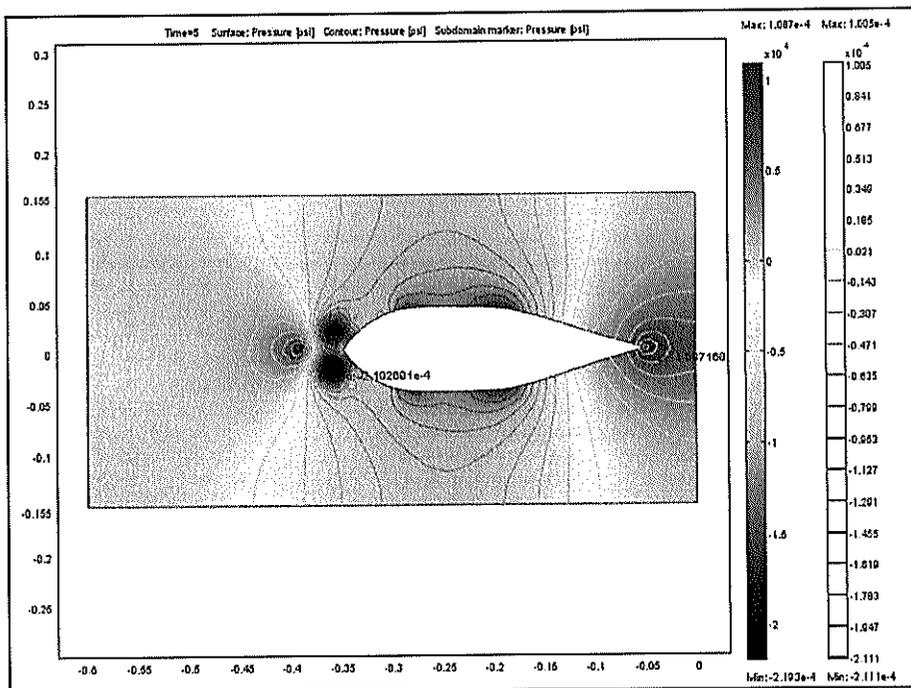


Distribución de Velocidad: Plano de flotación 3, $U = 0.6$ m/seg.

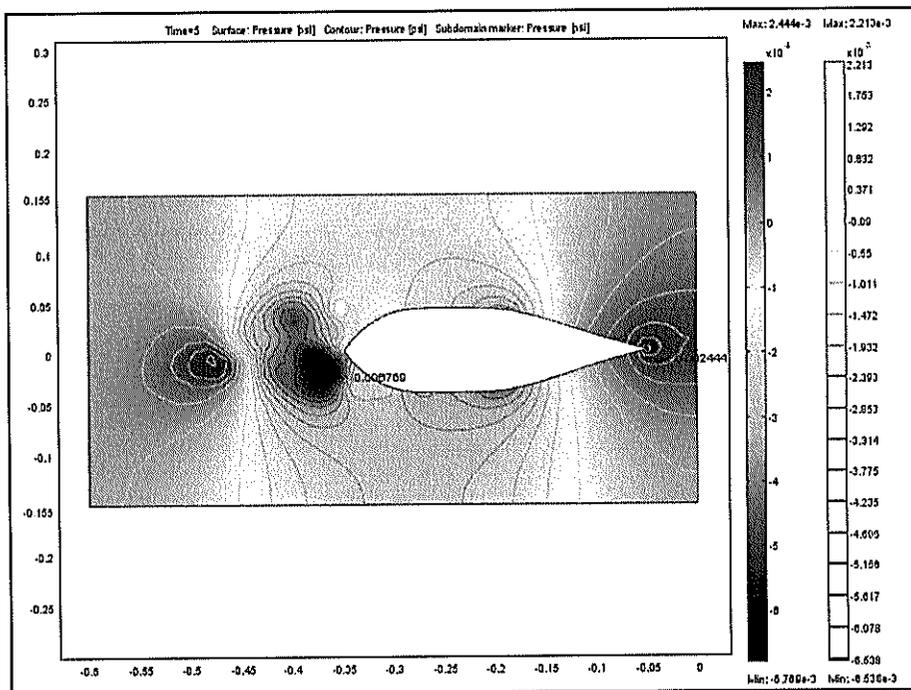
APÉNDICE D

Distribución de presiones alrededor de los planos de Flotación WP1, WP2, y WP3, obtenidos de forma numérica.

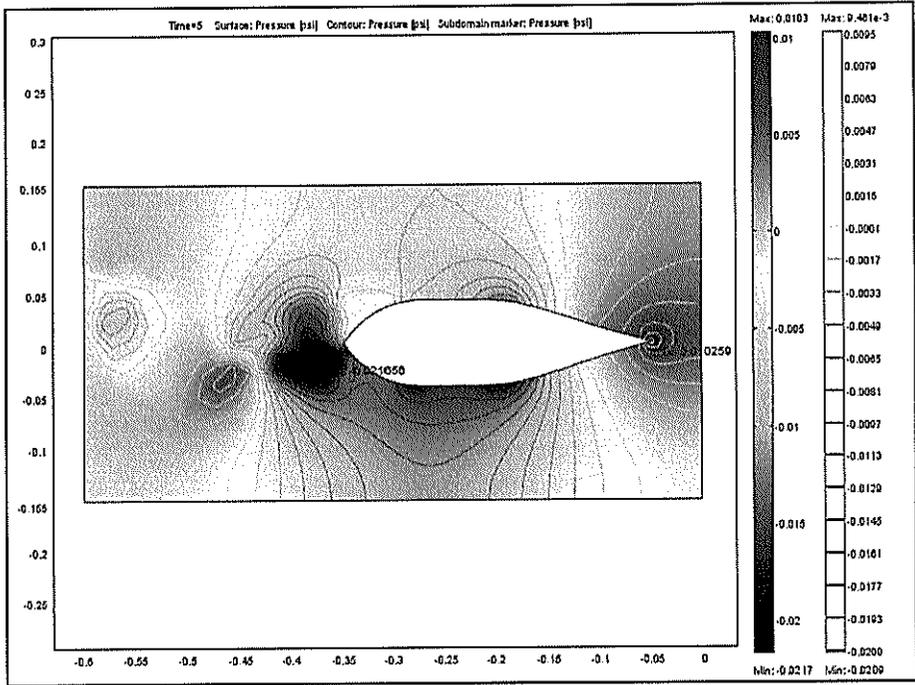
En el presente apéndice se muestra la distribución de presiones en el campo fluido alrededor de los planos de flotación. Las presiones obtenidas numéricamente se presentan en unidades de PSI, y en las graficas se muestra el máximo y mínimo valor obtenido en cada simulación, para cada modelo a velocidades de flujo libre de 0.04, 0.2, 0.4, 0.6 m/seg. Además se presenta la escala de colores para identificar las zonas de altas y baja presión.



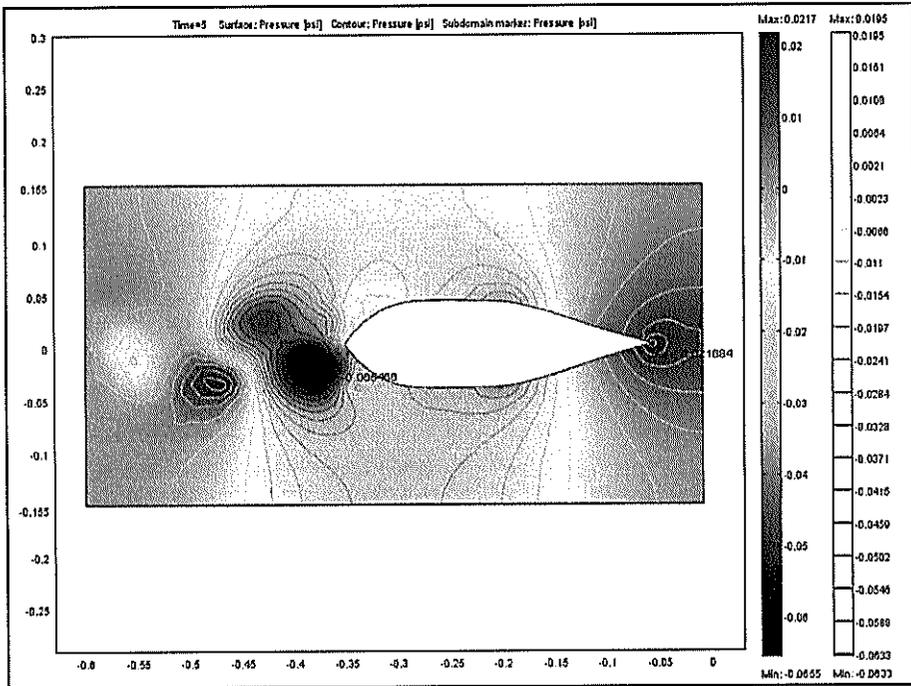
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 1, $U=0.04$ m/seg.



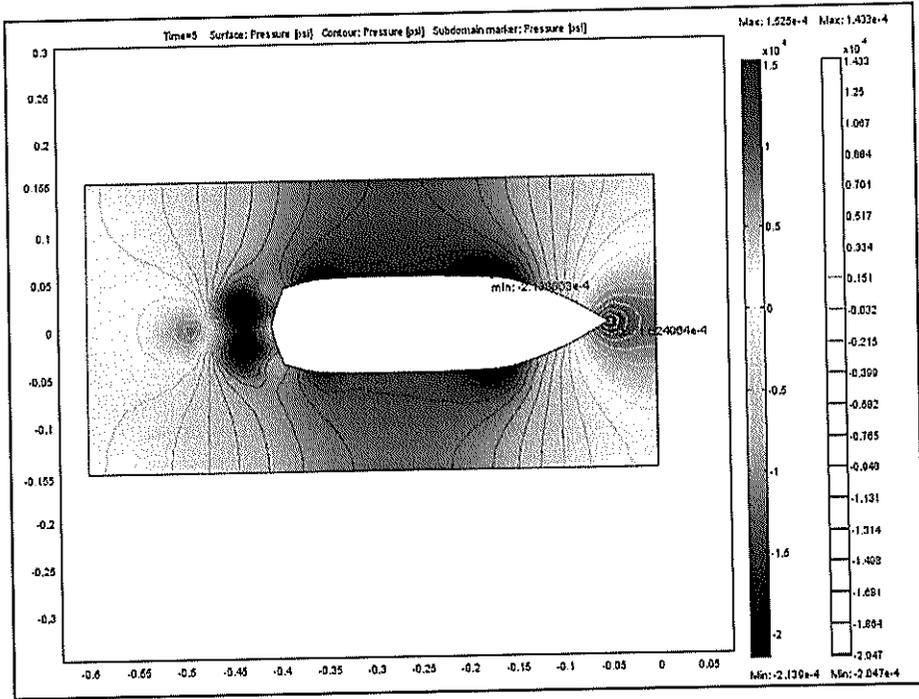
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 1, $U=0.2$ m/seg.



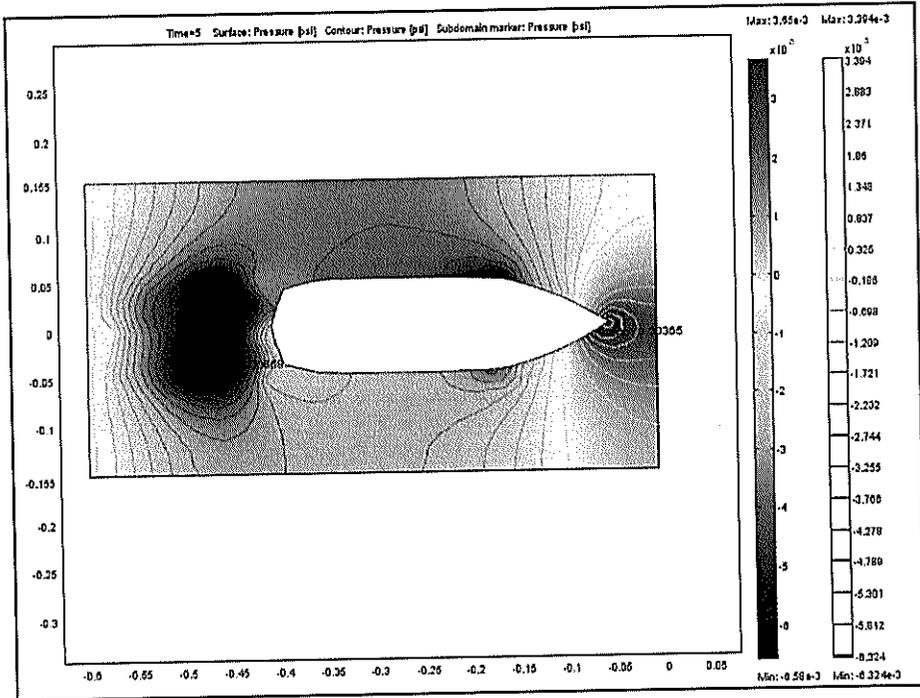
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 1, $U=0.4$ m/seg.



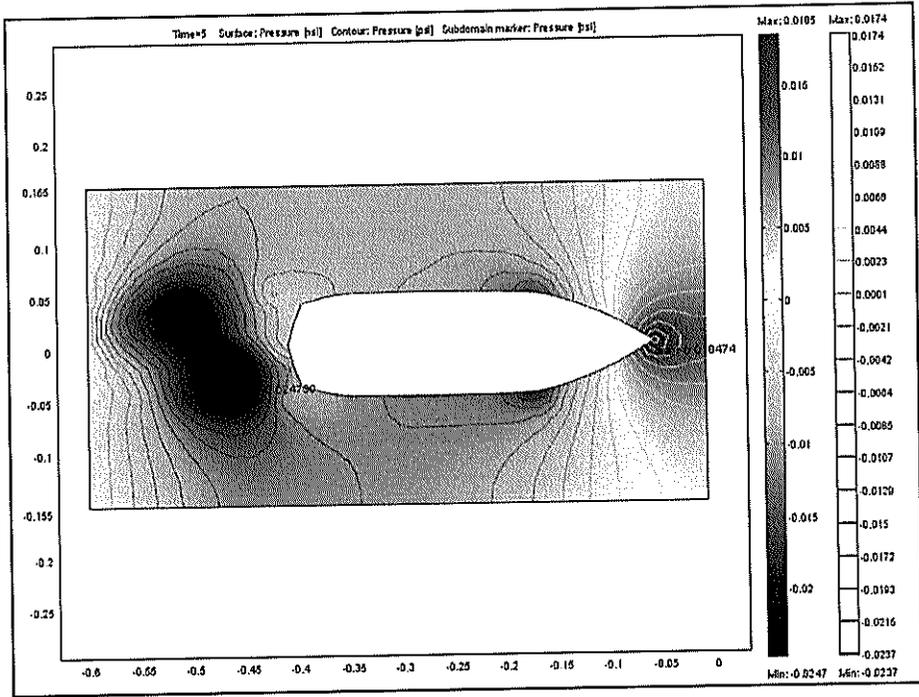
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 1, $U=0.6$ m/seg.



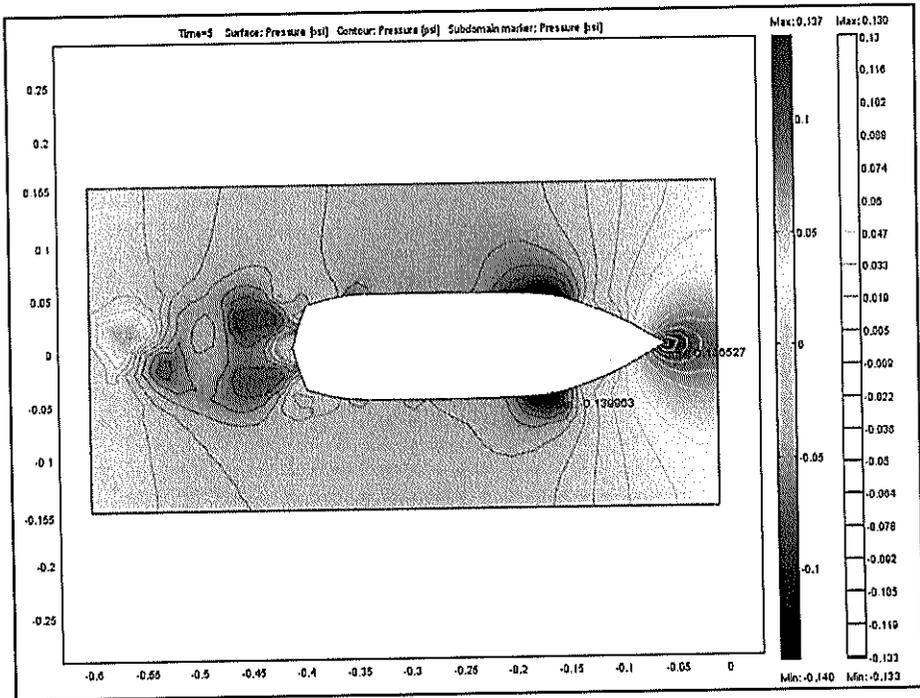
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 2, $U=0.04$ m/seg.



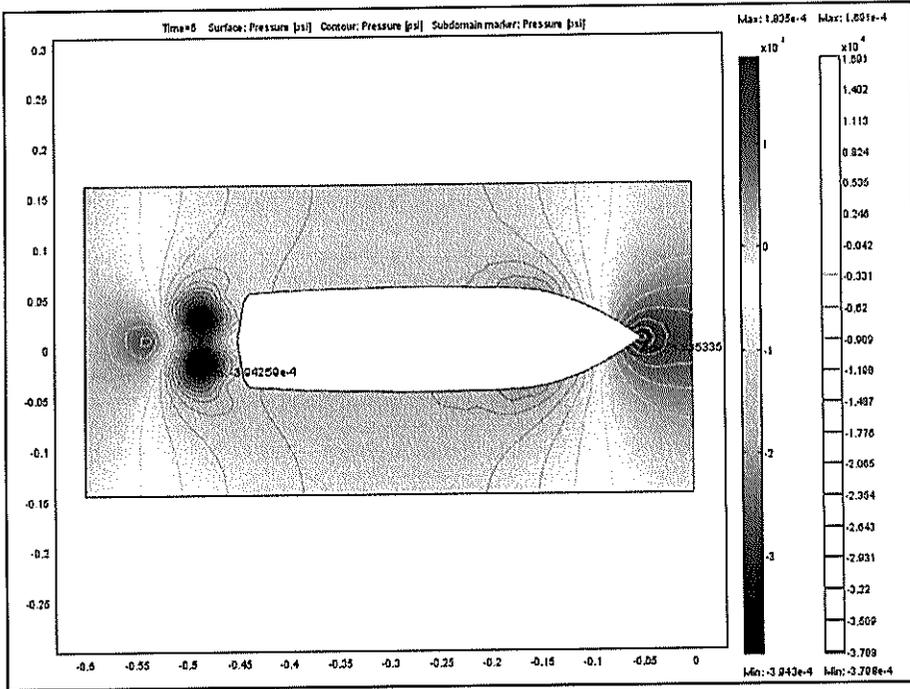
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 2, $U=0.2$ m/seg.



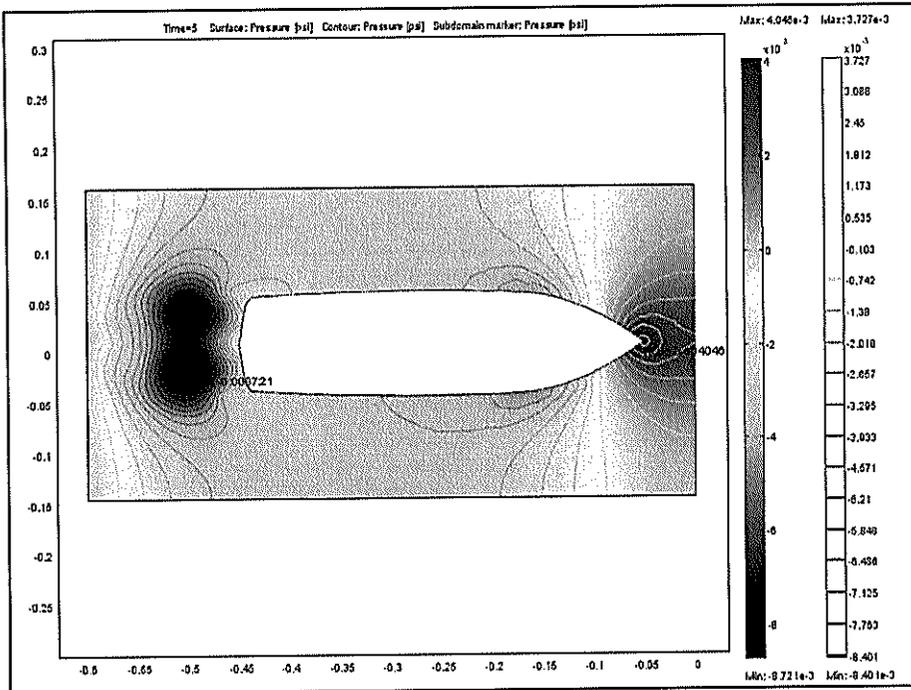
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 2, $U=0.4$ m/seg.



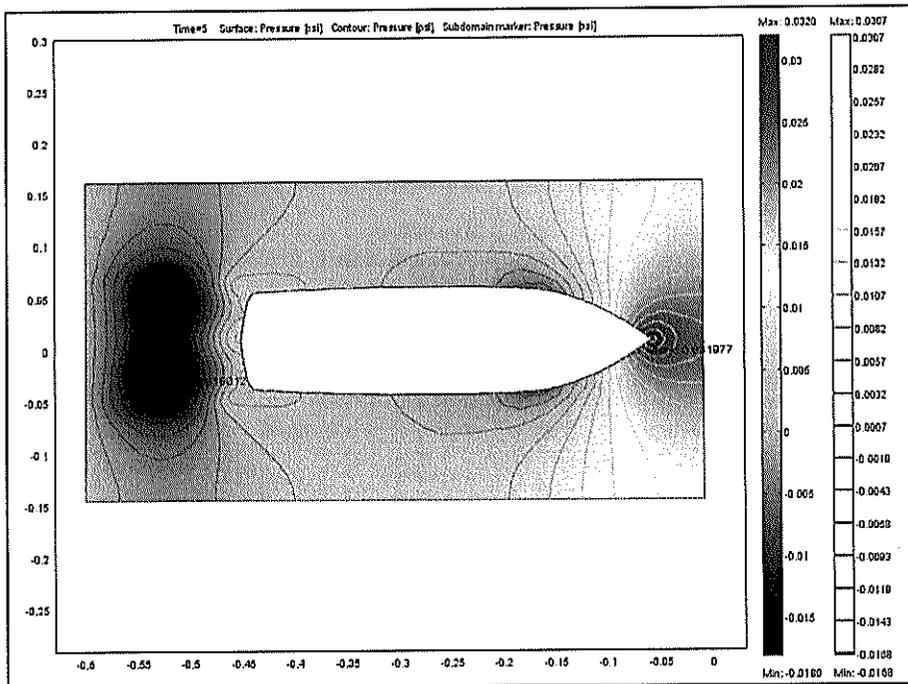
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 2, $U=0.6$ m/seg.



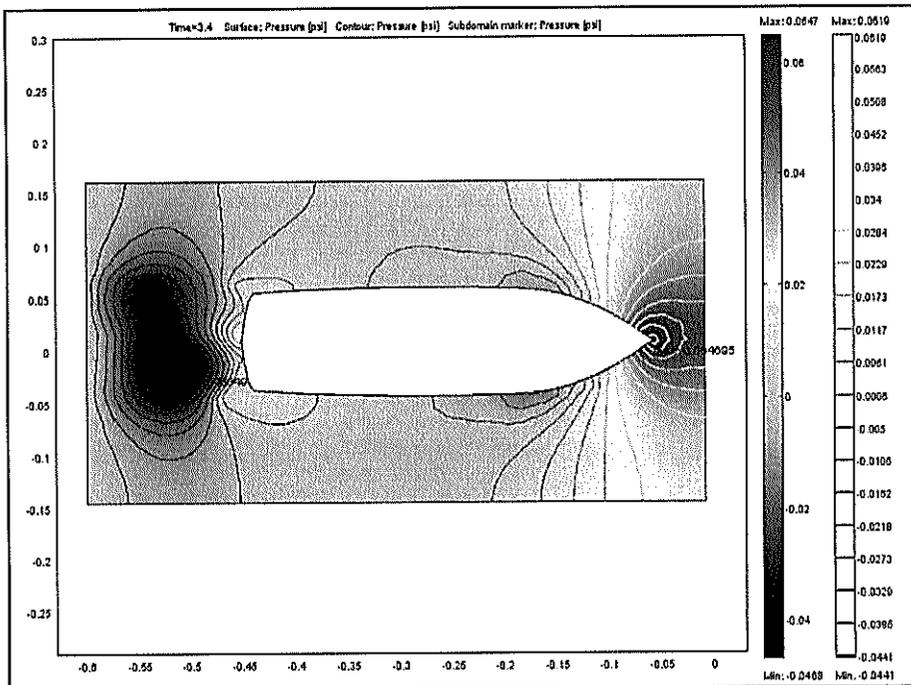
Distribución de Presiones: Plano de Flotación 3, $U=0.04$ m/seg.



Distribución de Presiones: Plano de Flotación 3, $U=0.2$ m/seg.



Distribución de Presiones: Plano de Flotación 3, $U=0.4$ m/seg.



Distribución de Presiones: Plano de Flotación 3, $U=0.6$ m/seg.

BIBLIOGRAFÍA

[1] **NAKAYAMA, Y.**, Introduction to Fluid Mechanics. Reprinted with revisions by Butterworth-Heinemann 2000.

[2] **ARGÜELLES DÍAZ, K., PARRONDO GAYO, J., FERNÁNDEZ ORO, J.**, Prácticas de Mecánica de fluidos, Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, 2005.

[3] **UGARTE PALACIN, F.**, Mecánica de Fluidos II. Editorial San Marcos, Lima-Perú, 23 de septiembre de 1991.

[4] **HUGHES, WILLIAM F., BRIGHTON, JOHN A.**, Dinámica de los Fluidos, teoría y 100 problemas resueltos, McGraw-Hill, 1970.

[5] **WHITE, FRANK M.**, Mecánica de Fluidos, McGraw-Hill, 1991.

[6] **NEWMAN, J. N.**, Marine Hydrodynamics. Massachusetts Institute of Technology, Third printing, 1980.

[7] **LÓPEZ MEJÍA, O. D., TORO, J. R.**, Modelamiento Computacional de la calle de Vórtices de Karman por dinámica de Vorticidad.

[8] **DAILY, JAMES W., HARLEMAN, DONALD R.F.**, Dinámica de los fluidos con aplicación a la ingeniería, Editorial Trillas, México 1975.

http://columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/358/1/mi_1244.pdf

[9] **ANDERSON, JOHN D., JR.**, Computational Fluid Dynamics, McGraw-Hill, Inc. 1995.

[10] **CARRO CEPEDA, F., HERNÁNDEZ GONZÁLES, F. A.**, Estudio de la Influencia de las Ruedas y los Pasos de Rueda en la Aerodinámica de un Automóvil. Universidad Politécnica de Catalunya. Abril del 2006.

<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/2952>

[11] **DANTEC DYNAMICS A/S.**, BSA Flow Software Version 4.10 Installation & User's Guide, 2006.

[12] **COMSOL Multiphysics.**, User's Guide, © COPYRIGHT 1994-2007 by COMSOL AB. All rights reserved.

[13] **COMSOL Multiphysics.**, Modeling Guide, © COPYRIGHT 1994-2007 by COMSOL AB. All rights reserved.

[14] **AHRWEILLER FERRERA, CHLOÉ.**, Simulación de hidrogenación de aceite de girasol por el software comercial COMSOL MULTIPHYSIC 3.2. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de ingeniería Química. Mayo del 2006.

<http://upcommons.upc.edu/pfc/handle/2099.1/3149>