

SIMULACION NUMERICA DE TOMAS DE AGUA EN MUELLES

Carlos Bacolla¹, Alejandro Dabin¹ y Gerardo Franck^{2,3}

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, cc 217. Ruta Nacional 168, Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina
e-mail: cbacolla@fich1.unl.edu.ar, aledabin@argentina.com

² Aula CIMNE-FICH. FICH, UNL. Ruta Nacional 168 Km 472.4, (3000) Santa Fe, Argentina
³ CIMEC – INTEC, Güemes 3450, (3000) Santa Fe, Argentina.
e-mail: gfranck@intec.unl.edu.ar

Palabras claves: toma de agua, muelle, río, bombas sumergibles, simulación numérica.

Resumen: *El sistema más difundido para las instalaciones de toma de agua de río, en la región litoral, es la disposición de bombas en muelle. En esta configuración, las mismas quedan sumergidas en la corriente natural, produciéndose la aducción en forma libre hasta su sección de entrada. En dichas instalaciones se han detectado anomalías hidráulicas que ocasionan caída en el rendimiento y vibraciones indebidas. Este trabajo presenta una serie de simulaciones numéricas, con dos objetivos: el primero de ellos, intenta determinar el comportamiento del flujo y predecir la ocurrencia de distintos tipos de vórtices, remolinos y asimetrías, con el fin de lograr mejoras en el diseño, elevando el rendimiento y disminuyendo vibraciones del sistema de bombeo. El segundo es comprobar que el programa de propósito general GiD y su módulo de cálculo Tdyn resultan una alternativa viable para dicha simulación. Ambos fueron usados para predecir y determinar el patrón de circulación en la vecindad de la toma. El modelo conserva las características y las dimensiones que presentan las principales instalaciones construidas sobre el río Paraná. Se realizaron simulaciones en 2D y 3D con modelo de turbulencia LES-Smagorinsky, con modificaciones en el diseño de la sección de ingreso, tendientes a corregir las anomalías encontradas.*

1 INTRODUCCIÓN

El sistema más difundido para las instalaciones de tomas de agua de río en la región litoral es la de disposición de bombas en muelle. En este tipo de toma las bombas quedan sumergidas en la corriente natural, o sea en un flujo libre con velocidades y profundidades variables, produciéndose la aducción en forma libre hasta la sección de entrada a las bombas.

Se detectaron en ellas varios problemas hidráulicos, como la formación de vórtices y asimetrías en los flujos de entrada, lo que ocasiona fuerte caída de rendimiento en las bombas y problemas mecánicos agudos.

El presente estudio tiene por objetivo la búsqueda de soluciones a estos problemas y la elaboración de especificaciones de diseño para este tipo de instalaciones.

2 CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES



Fig.1: Vista panorámica de la toma complementaria de agua de la ciudad de Santa Fe, pertenecientes a la empresa Aguas Provinciales de Santa Fe.

Estas instalaciones constan de una plataforma, en general construida en hormigón armado, ubicada por encima de los niveles máximos con respecto a las crecidas previsibles y soportada por pilotes enterrados en el cauce. Sobre la plataforma se apoya la placa de fijación del grupo motor-bomba, sobre ésta se encuentra el cuerpo principal de la misma, que contiene el cojinete de empuje, el de guía superior, el conducto de salida del agua y el soporte del motor de accionamiento. Por debajo de este plano se ubica la columna de la bomba, formada por el conducto de impulsión de agua, que internamente contiene el eje de mando y los cojinetes guías intermedios. En el extremo inferior de la columna se encuentra la bomba propiamente dicha, constituida por la carcasa, la tulipa de forma abocinada que guía los filetes del flujo y el rodete o los rodetes en el caso de un sistema de múltiples etapas.

La longitud de la columna de la bomba es función de la variación de los niveles del río, debiendo permanecer sumergida a una profundidad mínima, superior a la requerida, para evitar la entrada de aire y la cavitación en el rodete.

3 ESTUDIOS EXPERIMENTALES SOBRE MODELO

3.1 Descripción general

Las estaciones de bombeo y tomas de agua de cierta magnitud, por los volúmenes de las obras civiles, las potencias puestas en juego y los costos de conservación, justifican importantes estudios de investigación para optimizar su diseño, tendiendo al logro de la menor inversión y costo operativo, así como un adecuado funcionamiento hidráulico. El principal problema que presenta una instalación de bombeo para lograr que las bombas operen de manera óptima, respetando las condiciones de diseño, es lograr un adecuado ingreso del agua a las mismas.

Para satisfacer esto es necesario cumplir lo mejor posible las siguientes condiciones ideales del flujo:

- **Uniformidad.** En una sección transversal de la instalación, convenientemente definida, la magnitud y dirección de las velocidades en todos los puntos de la sección deben ser iguales.
- **Permanencia.** La magnitud y dirección de las velocidades no deben variar en función del tiempo.
- **Tipo de flujo.** El flujo debe ser de una sola fase, es decir, no debe haber arrastre de aire o de vapor.
- **Vorticidad.** No deben presentarse vórtices superficiales ni sumergidos.
- **Prerrotación del flujo.** El flujo que llega al impulsor de la bomba no debe presentar un giro excesivo.

En la búsqueda de estas condiciones se inició la investigación mediante la modelación física de un sistema simple compuesto por una sola bomba sumergida en una corriente uniforme, similar a las condiciones naturales de los ríos en la región litoral.

3.2 Modelo hidráulico

Los modelos que reproducen sistemas de flujo a superficie libre, como canales, ríos y estuarios, utilizados para resolver problemas de variación de niveles y cambios de patrones de flujo, debido al emplazamiento de estructuras dentro del mismo, funcionan en régimen turbulento.

Las fronteras del modelo en cada una de sus partes, así como el patrón de flujo conformado por las líneas de corrientes, deben satisfacer la similitud geométrica con el prototipo. Por otra parte la semejanza de los campos de velocidades y aceleraciones del sistema, conduce a satisfacer la semejanza del campo de fuerzas; y si se considera que las fuerzas preponderantes son las de inercia y gravedad, se obtiene la condición de Froude, resultando que los modelos hidráulicos deberán respetar las escalas de la Tabla 1.

MAGNITUD FÍSICA	ECUACIÓN BÁSICA	ESCALA
Longitud	L	$E_L = E_X = E_Y$
Area	$A = a \cdot b$	$E_A = E_L \cdot E_L = E_L^2$
Perímetro Mojado	$P = a + b$	$E_P = E_L$
Volumen	$V = a \cdot b \cdot c$	$E_V = E_a \cdot E_b \cdot E_c = E_L^3$
Velocidad	$V = L/t$	$E_v = E_L^{1/2}$ (Ley de Froude)
Tiempo	$T = L/v$	$E_t = E_L / E_v = E_L^{1/2}$
Aceleración	$A = v/t$	$E_a = E_v / E_t = 1$
Pendiente	$S = x/y$	$E_S = E_x / E_y = 1$
Radio Hidráulico	$R = A/P$	$E_R = E_L^2 / E_L = E_L$
Gasto	$Q = Va$	$E_q = E_v E_a = E_L^{5/2}$
Fuerzas	$F = m \cdot a$	$E_F = E_m E_a = E_p E_v E_a = E_L^3$
Presión	$P = F/A$	$E_p = E_m E_a$

Tabla 1: Escalas del modelo físico.

Para la realización de la modelación física bajo estas condiciones se encuentran fuertes limitaciones impuestas por el equipamiento disponible en el laboratorio, a saber: el tamaño de los canales, capacidad máxima de bombeo y sistemas de visualización y medición.

3.3 Descripción y resultados

Se realizaron ensayos en un canal vidriado sin pendiente de fondo, de 0,4 m de ancho, 0,6 m de profundidad y 10 m de longitud, alimentado desde un tanque de nivel constante. El nivel de agua en el mismo se regula mediante una compuerta ubicada aguas abajo y el caudal se mide mediante un vertedero triangular ubicado en el canal de retorno.

En este canal se resignan algunos aspectos de la representación, como los siguientes:

- El ancho total del canal es de 40 cm y el del modelo de 7,5 cm, lo que introduce una fuerte distorsión del flujo.
- La profundidad máxima útil del canal es de 40 cm, lo que limita fuertemente la modelación, ya que debe dejarse una distancia a la solera similar a la usual en el sistema representado y el tubo que representa la bomba debe quedar sumergido lo suficiente como para que no ingrese aire al mismo, quedando muy limitada la longitud de estudio del flujo de admisión a la bomba.

Se comenzó ensayando un sistema simple, compuesto por una sola bomba, la que fue modelada mediante un tubo de acrílico de 70 mm de diámetro interior y 700 mm de longitud, con un tubo interior concéntrico de 20 mm de diámetro interior, por donde se extrae el caudal bombeado, el que se puede regular en altura, acorde a los niveles de agua del canal. En el espacio anular comprendido entre ambos tubos, actúa la presión atmosférica, lo que permite medir diferencias de presión entre el canal y el interior de la camisa. La escala de representación adoptada inicialmente fue 1/10.

Para visualizar las condiciones del flujo se construyó un anillo de alambre con hilos finos de algodón atados al mismo y distribuidos en todo su perímetro. Este anillo se puede desplazar por el interior del tubo de acrílico de mayor diámetro, en forma concéntrica,

mediante alambres que sobresalen en la parte superior del tubo. Este dispositivo permite analizar las condiciones del flujo a distintos niveles.

Los caudales de la bomba modelo son extraídos mediante una pequeña bomba centrífuga que succiona del tubo interior del sistema descrito anteriormente y son regulados mediante una válvula esclusa. La medición de los mismos se realiza en forma volumétrica.



Fig.2: Canal de ensayo y modelo experimental de la camisa y bomba.

Se realizaron dos series de ensayos, los resultados de los mismos son los que se transcriben en la Tabla 2.

Hvert (m)	Qvert (l/s)	Hcanal (m)	Vcanal (m/s)	Vprot (m/s)	Qbmod (l/s)	Qbprot (l/s)	Qbprot (m ³ /h)	Condiciones del flujo
0.1679	9.8	0.312	0.08	0.25	1.25	395.3	1423.0	Flujo uniforme a Hc=2,5 cm
0.1815	12.4	0.322	0.10	0.31	1.25	395.3	1423.0	Flujo uniforme a Hc=5 cm
0.25	31.5	0.357	0.22	0.70	1.25	395.3	1423.0	Vórt. horiz. hasta h=10 cm y 0.5 D
0.2775	42.2	0.395	0.27	0.84	1.25	395.3	1423.0	Vórtices horiz. Todo Hc y 0.5 D
0.314	59.3	0.43	0.34	1.09	1.25	395.3	1423.0	Vórtices horiz. todo Hc y 0.5 D
0.2606	35.4	0.48	0.18	0.58	0.41	129.7	466.8	a 9 cm de la boca se regulariza el flujo
0.2606	35.4	0.48	0.18	0.58	0.295	93.3	335.8	a 13 cm de la boca se regulariza el flujo
0.2606	35.4	0.48	0.18	0.58	0.906	286.5	1031.4	a 8 cm de la boca se regulariza el flujo
0.2832	44.6	0.5	0.22	0.71	0.906	286.5	1031.4	a 8,5 cm de la boca se regulariza el flujo
0.2212	22.2	0.449	0.12	0.39	0.906	286.5	1031.4	a 1,0 cm de la boca se regulariza el flujo
0.2212	22.2	0.449	0.12	0.39	0.256	81.0	291.4	a 4,0 cm de la boca se regulariza el flujo
0.296	50.4	0.502	0.25	0.79	0.256	81.0	291.4	a 13 cm de la boca se regulariza el flujo
0.296	50.4	0.502	0.25	0.79	0.7	221.4	796.9	a 8 cm de la boca se regulariza el flujo
0.296	50.4	0.502	0.25	0.79	0.147	46.5	167.3	a 14 cm de la boca se regulariza el flujo
0.296	50.4	0.502	0.25	0.79	0.88	278.3	1001.8	a 10,5 cm de la boca se regulariza el flujo

Tabla 2: Serie de ensayos N° 1, con camisa cilíndrica y entrada libre.

La nomenclatura usada en la misma es la siguiente:

- Hvert = Carga total sobre el vertedero triangular (medición del caudal en el canal).
- Qvert = Caudal en el vertedero triangular = $1343 * (H - 0,0312)^{2,47}$.
- Hcanal = Altura de agua en el canal.
- Vcanal = Velocidad del agua en el canal.

- V_{prot} = Velocidad del agua en el en el río (prototipo).
- Q_{bmod} = Caudal de la bomba en el modelo.
- Q_{bprot} = Caudal de la bomba en el prototipo.

Las condiciones de flujo encontradas en cada ensayo son las que se describen en la última columna de la planilla de ensayos. Las alturas indicadas en cada caso, se refieren a la boca de entrada del tubo de mayor diámetro.

Del análisis de los resultados de los ensayos se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Al incrementar las velocidades en el canal, manteniendo igual caudal en la bomba, se incrementa la altura en el conducto a la cual se regulariza el flujo, o sea, la altura en la que desaparecen los vórtices de eje horizontal.
- Al incrementarse el caudal de la bomba, manteniendo igual la velocidad del agua en el canal, disminuye la altura a la cual se regulariza el flujo.
- Las velocidades representadas del río varían de 0,25 a 1,09 m/s en el prototipo, siendo las normales en el río Paraná las cercanas al valor máximo indicado. Las perturbaciones del flujo de ingreso a la bomba, para velocidades en el canal de ese orden, se encontraron hasta alturas de 8 a 14 cm en el modelo, que se corresponden con alturas de 0,8 a 1,4 m en el prototipo.

De esto se puede inferir que:

“En ningún caso una bomba simplemente sumergida en el río, podrá funcionar adecuadamente, siempre tendrá un flujo asimétrico y con vorticidad de eje horizontal que afectará su rendimiento y perturbará su operación”.

Para evitar las consecuencias indicadas en el punto anterior:

“En todos los casos se debe diseñar una aducción a la bomba que evite dicho problema, uniformando el flujo previo al ingreso a la misma”.

En una revisión de lo experimentado en los ensayos anteriores, se consideró que el sistema utilizado en ellos para la visualización del fenómeno introducía algunas incertidumbres, debido fundamentalmente a que los hilos podían estar indicando de manera incierta el cambio de situación del flujo por encontrarse interferido el libre movimiento de los numerosos hilos ubicados en varios aros de distintos diámetros, por interferencia mutua, dado al escaso espacio entre ellos. Para evitar esto se resolvió utilizar solo dos hilos atados cada uno de ellos a un alambre cuyo extremo se dobló a 90° respecto a la dirección del flujo, para asegura la libertad de movimiento de los mismos. De esta manera los hilos se pueden ubicar a distintas alturas y posiciones de cada sección horizontal.

Se realizó una serie de 10 ensayos con este nuevo sistema de visualización, confirmándose los resultados anteriores, pero con mayor certidumbre. Los resultados del mismo se transcriben en la Tabla 3.

Hvert (m)	Qvert (l/s)	Hcanal (m)	Vcanal (m/s)	Vprot (m/s)	Qbmod (l/s)	Qbprot (l/s)	Qbprot (m ³ /h)	Vbprot (m/s)	Dist. Fond. Mod. (cm)	Dist. Fond. Prot. (m)	Condiciones del flujo
0.1810	12.3	0.343	0.09	0.28	0.135	42.7	153.7	0.1	4.0	0.4	Flujo uniforme a Hc=0 cm
0.2070	18.3	0.362	0.13	0.40	0.135	42.7	153.7	0.1	4.0	0.4	Vort. horiz. hasta h=11,5 cm y 0.5 D
0.2070	18.3	0.362	0.13	0.40	0.325	102.8	370.0	0.3	4.0	0.4	Vort. horiz. hasta h=11,5 cm y 0.5 D
0.2070	18.3	0.362	0.13	0.40	0.438	138.5	498.6	0.4	4.0	0.4	Vort. horiz. hasta h=11,5 cm y 0.5 D
0.2070	18.3	0.362	0.13	0.40	0.577	182.5	656.9	0.5	4.0	0.4	Vort. horiz. hasta h=11,5 cm y 0.3 D
0.2070	18.3	0.362	0.13	0.40	0.577	182.5	656.9	0.5	8.0	0.8	Vort. horiz. hasta h=11,5 cm y 0.3 D
0.2070	18.3	0.362	0.13	0.40	0.794	251.1	903.9	0.7	8.0	0.8	Vort. horiz. hasta h=11,5 cm y 0.5 D
0.2070	18.3	0.362	0.13	0.40	0.907	286.8	1032.5	0.7	8.0	0.8	Vort. horiz. hasta h=14 cm y 0.5 D
0.2280	24.2	0.380	0.16	0.50	0.907	286.8	1032.5	0.7	8.0	0.8	Vort. horiz. hasta h=14 cm y 0.5 D
0.2550	33.3	0.408	0.20	0.64	0.907	286.8	1032.5	0.7	8.0	0.8	Vort. horiz. hasta h=14 cm y 0.5 D

Tabla 3: Serie de ensayos N° 2, con camisa cilíndrica sin boquilla y visualización con solo dos hilos.

Los ensayos anteriores han permitido deducir que la distribución del flujo es fuertemente asimétrica en la sección de entrada a la bomba, en la dirección de la corriente en el canal y simétrica en dirección perpendicular.

Lo expresado anteriormente, hizo pensar que el subdividir la sección de entrada a la bomba en varias secciones perpendiculares a la dirección de la corriente en el canal, con elementos orientadores del flujo, podría mejorar la distribución. Se construyó una boquilla como la representada en la figura siguiente, que genera cualitativamente las condiciones buscadas.

Se realizó una serie de 11 ensayos con esta boquilla correctora, obteniéndose los resultados que se transcriben en la Tabla 4. De la observación de los mismos se puede inferir, que las condiciones del flujo mejoran en relación a los ensayos anteriores, pero mantiene un grado importante de asimetría.

Hcanal (m)	Vcanal (m/s)	Vprot (m/s)	Qbmod (l/s)	Qbprot (l/s)	Qbprot (m ³ /h)	Vbprot (m/s)	Dist. Fond. Mod. (cm)	Dist. Fond. Prot. (m)	Condiciones del flujo
0.440	0.06	0.18	0.480	151.8	546.4	0.4	8.0	0.8	Flujo uniforme desde Hc=0 cm
0.466	0.10	0.31	0.480	151.8	546.4	0.4	8.0	0.8	Flujo uniforme desde Hc=0 cm
0.493	0.14	0.45	0.480	151.8	546.4	0.4	8.0	0.8	Flujo uniforme desde Hc=0 cm
0.512	0.18	0.57	0.480	151.8	546.4	0.4	8.0	0.8	Flujo semiuniforme-inestable desde Hc=5 cm
0.512	0.18	0.57	0.876	277.0	997.3	0.7	8.0	0.8	Flujo semiuniforme-inestable desde Hc=5 cm
0.512	0.18	0.57	0.146	46.2	166.2	0.1	8.0	0.8	Flujo casi uniforme desde Hc=0 cm
0.512	0.18	0.57	0.282	89.2	321.0	0.2	8.0	0.8	Flujo semiuniforme-inestable desde Hc=0 a 5 cm
0.512	0.18	0.57	0.363	114.8	413.2	0.3	8.0	0.8	Flujo semiuniforme-inestable desde Hc=0 a 5 cm
0.533	0.22	0.69	0.363	114.8	413.2	0.3	8.0	0.8	Vort. horiz. desde Hc=0 a 5 cm
0.495	0.15	0.48	0.363	114.8	413.2	0.3	8.0	0.8	Flujo casi uniforme desde Hc=0 cm
0.464	0.10	0.30	0.363	114.8	413.2	0.3	8.0	0.8	Flujo casi uniforme desde Hc=0 cm

Tabla 4: Serie de ensayos N° 3, con boquilla horizontal y deflectores rectos.

Continuando en el sentido del efecto buscado en el ensayo N° 3, se construyó una boquilla con la boca de entrada inclinada un ángulo $\alpha=22,5^\circ$, en relación a la dirección de la corriente en el canal, manteniendo la subdivisión de la sección de entrada y los elementos pre-orientadores, tal como se muestra en la Fig. 3.

Se realizó una serie de 15 ensayos con esta boquilla correctora, obteniéndose los resultados que se transcriben en la Tabla 5.

De la observación de los mismos se puede inferir, que las condiciones del flujo mejoran en relación al ensayo N° 3, pero mantiene un grado considerable de asimetría.



Fig.3: Izq.: Sección de entrada a la camisa en posición horizontal y deflectores rectos subdividiendo el flujo.
Der.: Sección de entrada a la camisa inclinada 22.5° en relación a la dirección del flujo y deflectores rectos subdividiendo el mismo.

Se realizaron otros numerosos ensayos en este canal, probando diversos métodos de observación del fenómeno, llegando a la conclusión que el más confiable era mediante un único hilo que se sitúa en cada punto a analizar de cada sección. Esto llevó a extender fuertemente el tiempo de cada ensayo.

Hvert (m)	Qvert (l/s)	Hcanal (m)	Vcanal (m/s)	Vprot (m/s)	Qbmod (l/s)	Qbprot (l/s)	Qbprot (m ³ /h)	Vbprot (m/s)	Dist. Fond. Mod. (cm)	Dist. Fond. Prot. (m)	Condiciones del flujo
0.2150	20.5	0.465	0.11	0.35	0.530	167.6	603.4	0.4	5.0	0.5	Flujo uniforme a Hc=0 cm
0.2510	31.8	0.495	0.16	0.51	0.530	167.6	603.4	0.4	5.0	0.5	Flujo uniforme a Hc=0 cm
0.2760	41.5	0.515	0.20	0.64	0.530	167.6	603.4	0.4	5.0	0.5	Flujo uniforme a Hc=0 cm
0.2920	48.6	0.530	0.23	0.72	0.530	167.6	603.4	0.4	5.0	0.5	Flujo uniforme a Hc=0 cm
0.2920	48.6	0.530	0.23	0.72	1.100	347.9	1252.3	0.9	5.0	0.5	Flujo uniforme a Hc=5 cm
0.2920	48.6	0.530	0.23	0.72	0.977	309.0	1112.2	0.8	5.0	0.5	Flujo uniforme a Hc=3 cm
0.2920	48.6	0.530	0.23	0.72	0.876	277.0	997.3	0.7	5.0	0.5	Flujo uniforme a Hc=2 cm
0.2920	48.6	0.530	0.23	0.72	0.498	157.5	566.9	0.4	5.0	0.5	s/vort. - vel. Débiles a.arr.
0.2920	48.6	0.530	0.23	0.72	0.353	111.6	401.9	0.3	5.0	0.5	s/vort. - vel. Débiles a.arr.
0.2920	48.6	0.475	0.26	0.81	0.353	111.6	401.9	0.3	5.0	0.5	s/vort. - vel. Débiles a.arr.
0.2920	48.6	0.475	0.26	0.81	0.518	163.8	589.7	0.4	5.0	0.5	s/vort. - vel. Débiles a.arr.
0.2920	48.6	0.475	0.26	0.81	0.876	277.0	997.3	0.7	5.0	0.5	s/vort. - vel. Débiles a.arr.
0.2920	48.6	0.415	0.29	0.93	0.876	277.0	997.3	0.7	5.0	0.5	s/vort. - vel. Débiles a.arr.
0.2920	48.6	0.415	0.29	0.93	0.518	163.8	589.7	0.4	5.0	0.5	s/vort. - vel. muy Débiles a.arr.
0.2920	48.6	0.415	0.29	0.93	0.353	111.6	401.9	0.3	5.0	0.5	s/vort. - vel. muy Débiles a.arr.

Tabla 5: Serie de ensayos N° 4 con boquilla inclinada 22,5 ° y deflectores rectos.

A pesar de los avances logrados en el método de ensayo se consideró que este mantenía un importante grado de incertidumbre por las siguientes razones:

- Para pequeñas velocidades el hilo toma orientaciones que no se pueden precisar si corresponden al efecto de la gravedad o al sentido del flujo.
- La longitud de ensayo en el tubo de succión queda limitada por la altura de agua del canal, que en este canal resulta escasa, ya que cuando se acerca el hilo al tubo que representa la bomba resultan atraídos por este campo de velocidades, siendo este límite algo impreciso.
- Las mejores condiciones de flujo se consiguen cuando menor es la velocidad de succión y en esa situación pierde sensibilidad el sistema de observación.

- Con los hilos solo se define la orientación de las líneas de flujo, pero no se obtienen velocidades, por lo que podría cometerse el error de no detectar asimetrías de flujo.

Estas limitaciones en el sistema de ensayo han impedido un mayor avance hacia los objetivos del proyecto, ya que los pasos posteriores requieren cada vez mayor sensibilidad en el sistema de observación y medición para dar respuesta a los objetivos planteados. Desde el punto de vista de las normas técnicas de diseño, se pueden resumir los siguientes:

- Definición de la disposición geométrica y funcional para que el agua llegue al rodete de una bomba aislada en forma relativamente simétrica, sin vorticidad y con distribución uniforme de velocidades, evitando de ese modo la marcha irregular del rodete, sin esfuerzos asimétricos y fluctuantes, y disponiendo las condiciones para que la bomba alcance su máximo rendimiento.
- Diseño de la estructura soporte de la columna de impulsión de la bomba para aislarla de los efectos vibratorios de los vórtices de von Kármán.
- Identificación de las condiciones de sumersión mínima para evitar el ingreso de aire que no afecte al grupo motor-bomba inmerso en el flujo libre.
- Establecimiento del volumen de influencia de cada campana de aspiración para definir la distancia permisible entre bombas en el caso de utilizar más de un grupo motor-bomba.

4 REFORMULACIÓN DE PROYECTO

Si bien los desarrollos experimentales hasta aquí efectuados no dieron respuesta en forma completa a los objetivos planteados, formaron una base para el análisis que permitió una primera aproximación al problema. Los resultados obtenidos sirvieron de sustento al modelo matemático para la formulación de las pautas de diseño que se pretenden.

Sobre esta base se ha concebido el desarrollo de una etapa no prevista en el proyecto original en el que los resultados a obtener resulten de la integración del modelo físico y matemático.

Para ello se propuso realizar dicho proceso con las herramientas GiD, una interfase de usuario gráfica e interactiva usada para la definición, preparación y visualización de todos los datos relacionados a una simulación numérica y el módulo Tdyn, un entorno para la simulación de la dinámica de fluidos reales (CFD) basado en el método estabilizado de los elementos finitos.

5 ESQUEMA NUMERICO

En esta fase del trabajo se presenta una serie de simulaciones numéricas, con dos objetivos: el primero de ellos, intenta determinar el comportamiento del flujo y predecir la ocurrencia de distintos tipos de vórtices, remolinos y asimetrías, con el fin de lograr mejoras en el diseño, elevando el rendimiento y disminuyendo vibraciones del sistema de bombeo. El segundo es comprobar que el programa de propósito general GiD y su módulo de cálculo Tdyn resultan una alternativa viable para dicha simulación, con la ventaja que dicha simulación permite

ensayar números de Reynolds reales. Para cumplir los objetivos, se utilizaron los paquetes de software mencionados anteriormente, los cuales predicen y determinan el patrón de circulación en la vecindad de la toma. El modelo conserva las características y las dimensiones que presentan las principales instalaciones construidas sobre el río Paraná. Además, se realizaron simulaciones en 2D y 3D con el modelo de turbulencia algebraico LES–Smagorinsky, con modificaciones en el diseño de la sección de ingreso, tendientes a corregir las anomalías encontradas y definir nuevas formas para las tomas.

En una primera etapa se modelaron algunas de las situaciones ya ensayadas en el modelo físico buscando los siguientes objetivos:

- Comparar los resultados con los del modelo físico para revalidar la modelación matemática.
- Simplificar la modelación matemática, sobre la base de las inferencias del modelo físico, que permitan lograr resultados a corto plazo.
- Modelar situaciones con características relevantes bajo el punto de vista de las conclusiones a obtener para definir normas de diseño para las tomas muelle.

Como consecuencia de lo expresado anteriormente se decidió primeramente realizar las primeras simulaciones numéricas en 2D, lo que se considera válido por los resultados obtenidos en los ensayos experimentales, y simultáneamente se logra mayor rapidez de ejecución. A partir de estos resultados se realizaron algunas simulaciones en 3D para validar conclusiones, en especial con un diseño definido. Las magnitudes adoptadas son coincidentes con las que típicamente se encuentran en las tomas establecidas.

5.1 Casos modelados

Los casos modelados con **GID** como pre y pos procesamiento y **Tydn** como elemento de resolución numérico, son los siguientes:

- **Caso 1:** Camisa cilíndrica con sección de succión horizontal, sin deflectores
- **Caso 2:** Camisa cilíndrica con sección de succión horizontal, con deflectores rectos.
- **Caso 3:** Camisa cilíndrica con sección de succión inclinada 22,5°, con deflectores rectos.
- **Caso 4:** Camisa cilíndrica con sección de succión inclinada 45°, con deflectores rectos.
- **Caso 5:** Camisa cilíndrica con sección de succión inclinada 45°, con deflectores curvos.

En todos ellos hemos tomado como velocidad de circulación en el río 1 [m/seg.] y en la camisa se ha impuesto una succión de 0.2 [atm], simulando la impulsión de la bomba.

6 DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL MODELO Y GENERACIÓN DE LA MALLA

6.1 Modelo bidimensional

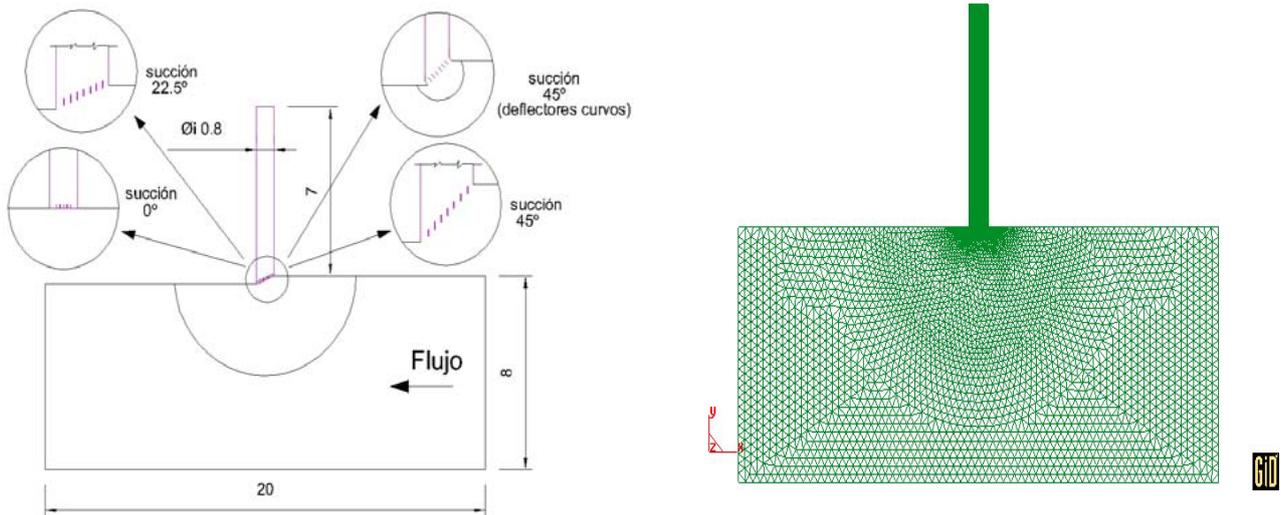


Fig.4: Izq.: Esquema de los diferentes modelos 2D planteados. Der.: una de las mallas computacionales para las simulaciones 2D.

La Fig. 4 esquematiza las dimensiones del dominio computacional utilizado para el cálculo en 2D. Representa una geometría bastante simple y ha sido generada por medio de una herramienta de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Se pueden observar las diferentes configuraciones en la admisión de la cañería toma de la bomba. Las mismas fueron establecidas tratando de encontrar el diseño que mejor se adecue a los objetivos perseguidos. Las dimensiones del dominio computacional se fijaron tratando de encontrar un balance entre establecer una lejanía de los bordes del mismo frente a las perturbaciones en la zona de la toma y la cantidad de elementos insertado por el generador automático de mallas que tiene incorporado GiD (este último en función de nuestra capacidad computacional). Para ello hemos fijado tanto el borde de entrada como el de salida a 12.5 diámetros de la cañería, alejados del centro de la misma. El flujo se desplaza de derecha a izquierda (ver Fig. 4) en la dirección del eje x (*streamwise*) y en la cañería de succión en la dirección del eje y (*stream-normal*). Dicha cañería tiene una longitud de 8.75 diámetros, siendo este último de 0.8 m, de acuerdo con las dimensiones de la toma mostrada en la Fig. 1 que corresponde a la ciudad de Santa Fe. Hemos considerado conveniente establecer el borde superior del dominio computacional coincidente con el punto de entrada a la camisa, evitando en este caso de simulación 2D, el efecto ocasionado por los vórtices de eje horizontal. El borde del fondo fue fijado a una distancia tal que sea imperceptible el efecto de succión (10 diámetros de cañería).

6.2 Modelo Tridimensional

6.2.1 Dominio computacional y generación de la malla

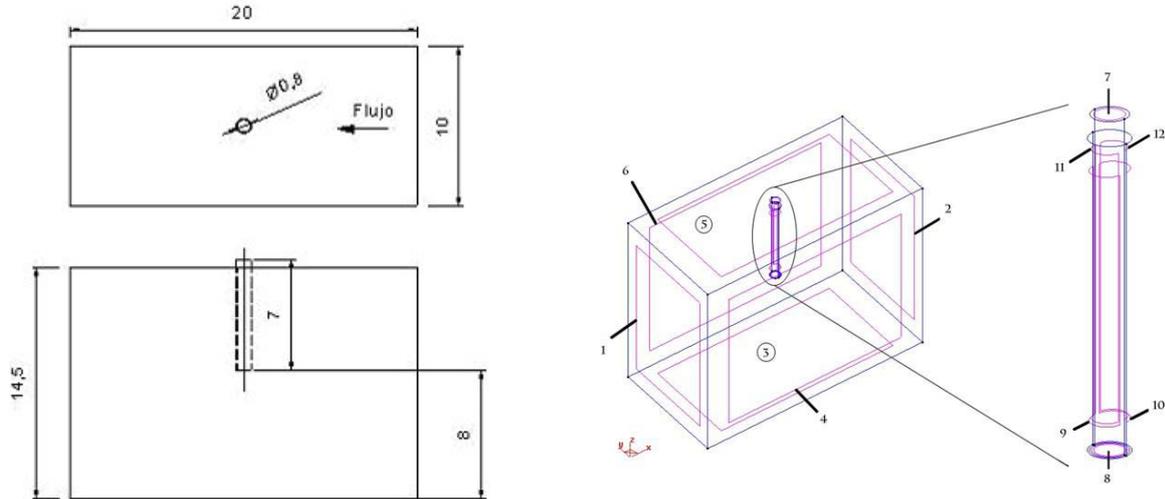


Fig.5: Dominio computacional para 3D. Sup. izq. Vista en planta. Inf. izq.: vista lateral. Der.: vista tridimensional. Flujo entrante desde la derecha a una velocidad de 1[m/s].

La Fig. 5 esquematiza las dimensiones del dominio computacional utilizado para el cálculo en 3D, similar al caso 2D, sólo que la dimensión transversal (*spanwise*) corresponde al eje y , la de altura (*stream-normal*) al eje z y la de la dirección del flujo en el río (*streamwise*) al eje x . Se pueden observar también las fronteras del dominio, estableciendo la entrada y salida a idéntica distancia que el caso 2D, fijando la de la superficie libre a 18 diámetros del fondo, el que se encuentra a igual distancia que en el caso 2D. Las laterales fueron establecidas cada una de ellas a 6.25 diámetros del centro de la cañería. El flujo en el río se desplaza de derecha a izquierda.

En la siguiente figura se observa la construcción de la malla tridimensional de tetraedros, partiendo de las correspondientes mallas de superficie y utilizando GiD como generador automático (método de avance frontal). Se visualiza el refinado en el interior de la camisa, en la pared exterior a la misma, que son las zonas donde se producen los fenómenos de separación, remolinos o vorticidades. Se obtuvo una malla de 84994 nodos y 508563 elementos. El tamaño promedio de los elementos dentro de la camisa es de 0.1 [m] y cerca de las fronteras del dominio exterior es de 0.9 [m]. El valor mínimo de estos en la zona de la entrada es de 0.02 [m]. No se intentó incorporar elementos más pequeños por falta de capacidad computacional, pero se ha tratado de refinar las zonas cercanas a la pared y en las zonas próximas a los deflectores en los diseños que incorporan a los mismos.

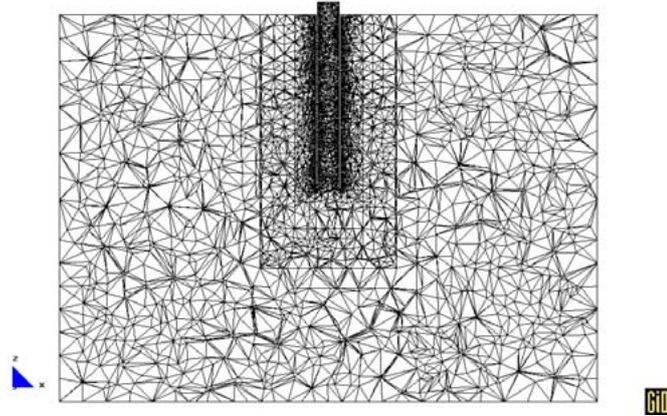


Fig.6: Vista en un corte longitudinal de la malla computacional 3D.

7 DESCRIPCION MATEMATICA DEL MODELO – RESOLUCION NUMERICA

Tdyn resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes en dos y en tres dimensiones para un fluido viscoso e incompresible o ligeramente compresible en un dominio Ω y en un intervalo de tiempo $(0, T)$:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u}) + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) \right) &= \nabla \cdot (\mu_{eff} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) - \nabla p && \text{en } \Omega \times (0, T) \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 && \text{en } \Omega \times (0, T) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $\mathbf{u} = u(x, t)$ denota el vector velocidad, $\mathbf{p} = p(x, t)$ el campo de presiones, ρ la densidad (constante), m la viscosidad dinámica del fluido y f la aceleración volumétrica. Las ecuaciones de arriba necesitan ser combinadas con las condiciones de borde adecuadas que en nuestro caso consisten en una condición de velocidad impuesta en la entrada igual a 1[m/s] (lo usual en el caso del río Paraná) para la componente en la dirección de la corriente (x) y nula en la restante en el caso 2D o nulas en la transversal (y) y en la de altura (z) en el caso 3D. La condición sobre las paredes del dominio es de deslizamiento (*slip*) y en la salida una condición de presión nula, debido a que ésta es un variable del tipo implícita, intrínseca e independiente del movimiento, tal que instantáneamente se “ajusta a sí misma” para satisfacer la condición de incompresibilidad y, por lo tanto, estará definida a menos de una constante. En la camisa adoptamos una condición de no deslizamiento (*no-slip*) con velocidad nula en las paredes y una condición de presión negativa (succión a -0.2 [atm]) a la salida de la misma (entrada a la admisión de la bomba). En todos los casos se impuso una velocidad inicial nula en la camisa. La discretización espacial de las ecuaciones de Navier–Stokes se realiza mediante el método de elementos finitos, mientras que para la temporal debe considerarse un algoritmo iterativo tal como el método de pasos fraccionarios (Fractional Step Method) de dos pasos (implícito). Los problemas con convección dominante, como el que se

está analizando, son estabilizados por el llamado método de “Cálculo de Incrementos Finitos”.

Para realizar el cálculo se efectuaron seis pasos. En cada uno de los mismos se fue variando la viscosidad cinemática del fluido empezando con un número de Reynolds de 80 y llegando hasta el valor de 800.000, el cual corresponde al problema estudiado.

8 MODELO DE TURBULENCIA LES-Smagorinsky

Este es el modelo adoptado en el presente trabajo. La expresión algebraica para la viscosidad turbulenta en cada punto del dominio es la siguiente:

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = C_s h^e \sqrt{\mathbf{S}(\mathbf{u}) : \mathbf{S}(\mathbf{u})} \quad (5)$$

donde C_s es la constante de Smagorinsky, h^e es el tamaño de la malla y el parámetro que marca los límites de separación entre las dimensiones de los vórtices resueltos por el modelo de aquellos que son modelados o filtrados. Finalmente, $\sqrt{\mathbf{S}(\mathbf{u}) : \mathbf{S}(\mathbf{u})}$ representa la traza del tensor velocidad de deformación e introduce una característica local en el tratamiento de la turbulencia ya que este factor depende de la tensión de corte local del flujo.

9 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se analizarán cada uno de los casos planteados, mostrándose valores instantáneos de los resultados obtenidos.

Caso 1: Se observa una fuerte vorticidad de eje horizontal en el borde aguas arriba de la camisa, la que se propaga en toda su longitud, generándose altas velocidades hacia arriba en la pared aguas abajo de la misma, disminuyendo aguas arriba hasta hacerse negativa en algunos casos. Coincidiendo en general con los resultados del modelo físico. La distribución de velocidades y por tanto el caudal a distintas elevaciones se mantiene con fuertes concentraciones en la mitad de aguas arriba de la camisa, por lo que una bomba sumergida en dicho flujo está sometida a la misma distribución en la sección de aducción, generando condiciones totalmente fuera de las condiciones de diseño en cuanto al flujo y provocando asimetrías de carga que se traducirán en pulsaciones y vibraciones.

En las Figs. 7 y 8 se muestran los campos de vorticidad y presión del caso 1, en el modelo bidimensional

En el caso tridimensional los resultados son coincidentes en rasgos generales con los de la simulación 2D. Se observa un flujo no estacionario, es decir que dentro de la camisa, el flujo nunca deja de ser turbulento.

Además se nota una gran velocidad del flujo sobre la pared aguas abajo (ver Fig.9 Izq.), mientras que aguas arriba se tienen bajas velocidades y algunos vórtices de eje horizontal apuntando al eje y (Fig.9 Der.).

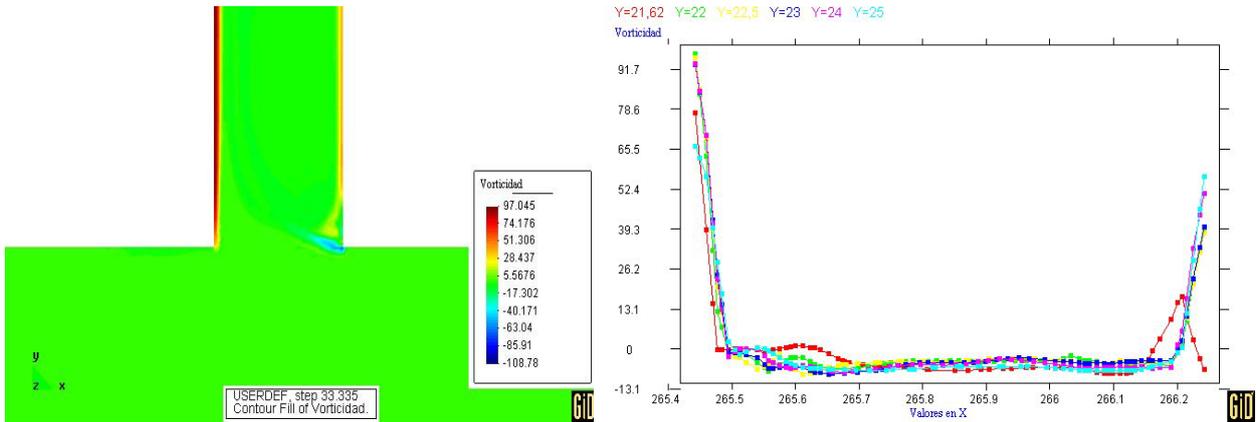


Fig. 7: Izq.: Contornos rellenos del campo de vorticidad cercano a la entrada. Der.: Gráfica de vorticidad en varias secciones de la cañería a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.6, 1.1, 1.6, 2.6, 3.6$ m.

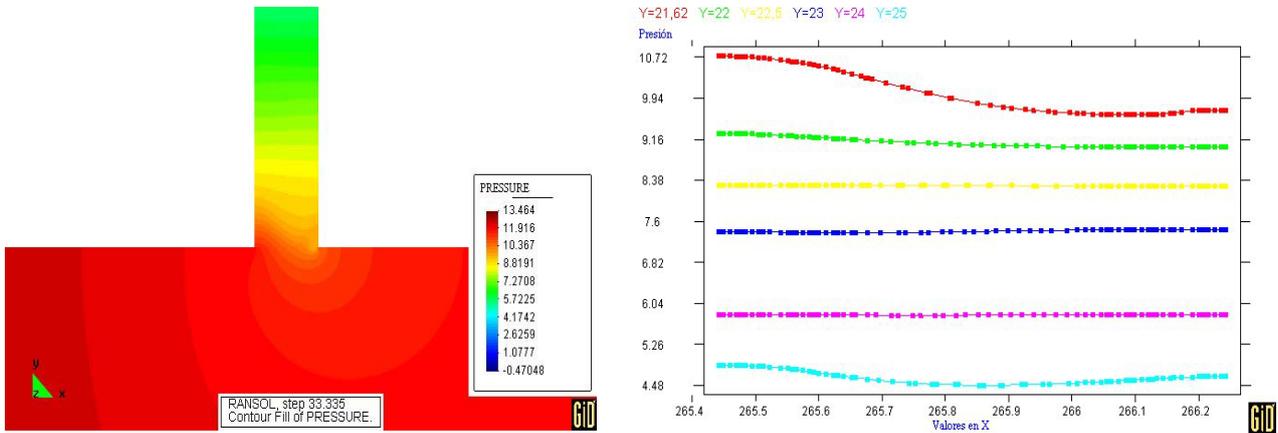


Fig. 8: Izq.: Contornos rellenos del campo de presión cercano a la entrada. Der.: Gráfica de presión en varias secciones de la cañería a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.6, 1.1, 1.6, 2.6, 3.6$ m.

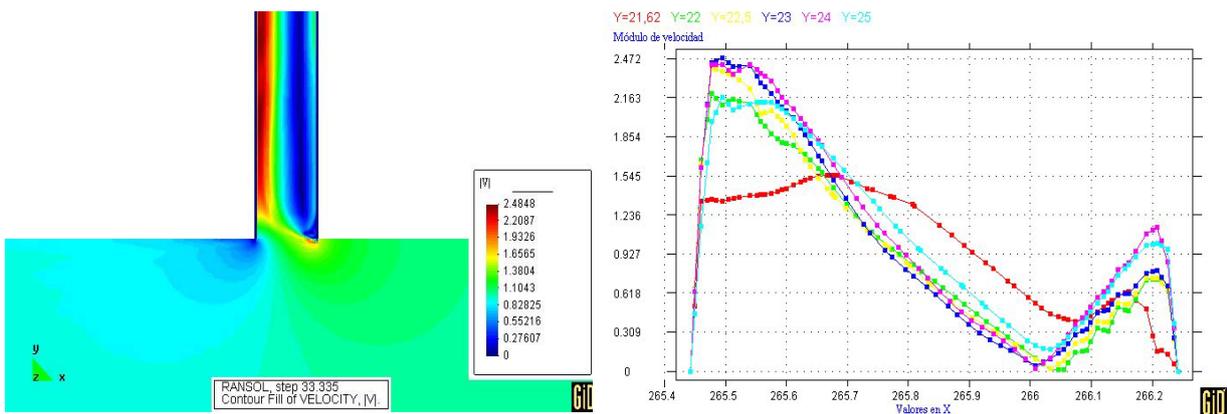


Fig. 9: Izq.: Contornos rellenos del módulo de velocidad cercano a la entrada. Der.: Gráfica de módulo de velocidad en varias secciones y a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.6, 1.1, 1.6, 2.6, 3.6$ m.

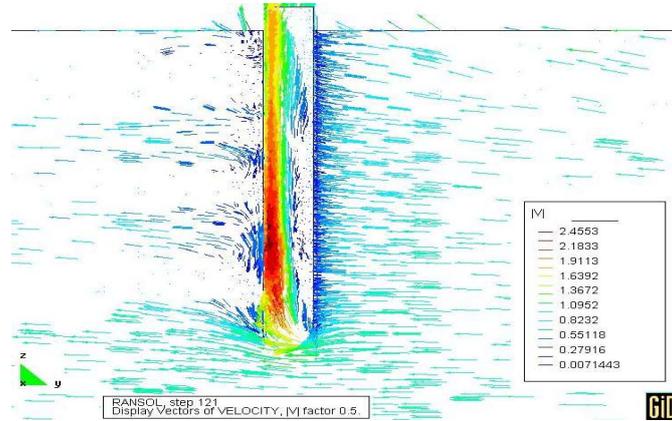


Fig. 10: Izq.: Vectores de velocidad instantáneos (corte transversal XZ)

Para la modelación 2D se supuso que el flujo dentro de la camisa era simétrico con respecto al eje y. Sin embargo esto no sucede en 3D como se ve en la Fig.11. También se pueden observar algunos vórtices de eje horizontal apuntando al eje X.

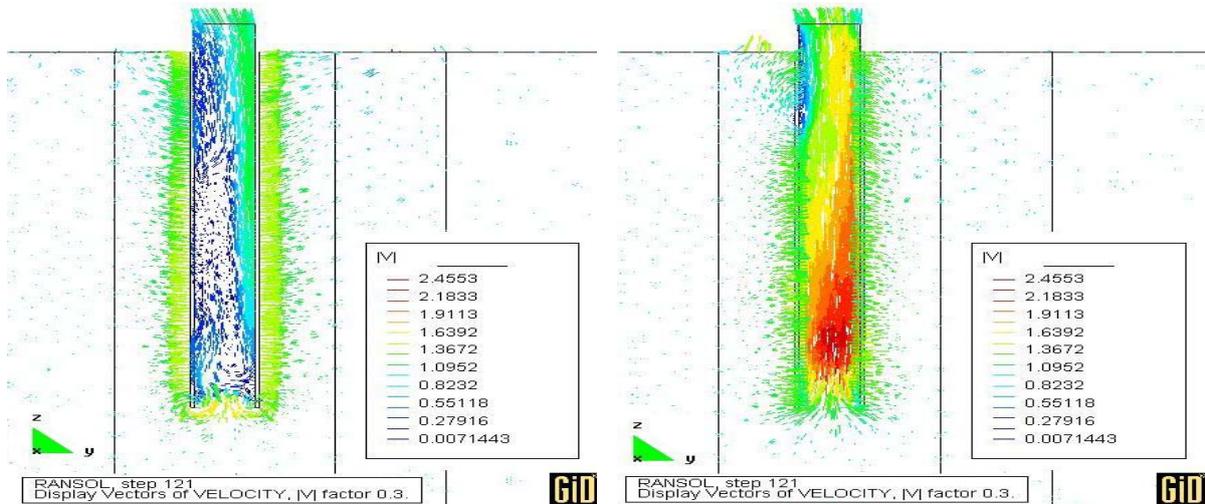


Fig. 11: Vectores de velocidad instantánea. Izq.: 0.2 m aguas arriba del eje de la camisa. Der. 0.2 m aguas abajo del eje de la camisa (corte transversal YZ).

En Fig. 12 se observan los perfiles de velocidad a diferentes alturas dentro de la camisa (las medidas están tomadas con respecto al eje x y al eje z). Aquí también se pueden observar las altas velocidades que se tienen aguas abajo.

Caso 2: Se observa una vorticidad mas débil que en el caso anterior en el primer tramo de la camisa, tendiendo a disminuir hacia arriba. Se mantienen velocidades altas sobre la pared aguas arriba de la camisa. También coincidente en rasgos generales con los resultados del modelo físico, tal como lo muestra la Fig. 13.

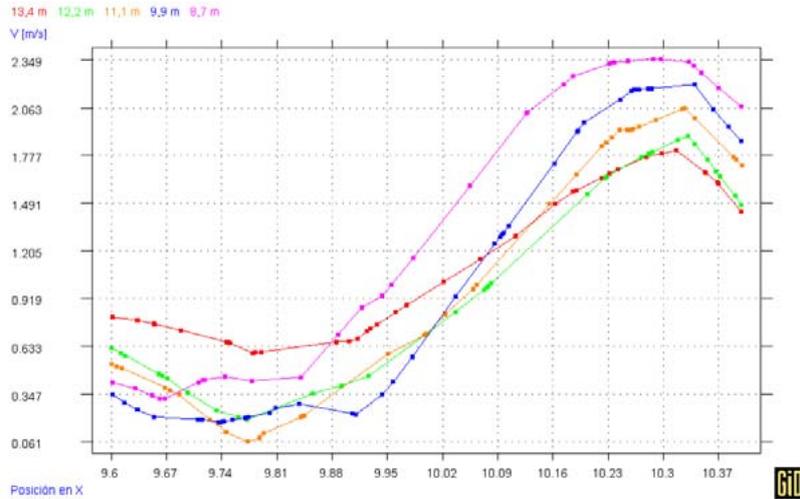


Fig. 12: Velocidades instantáneas dentro de la camisa.

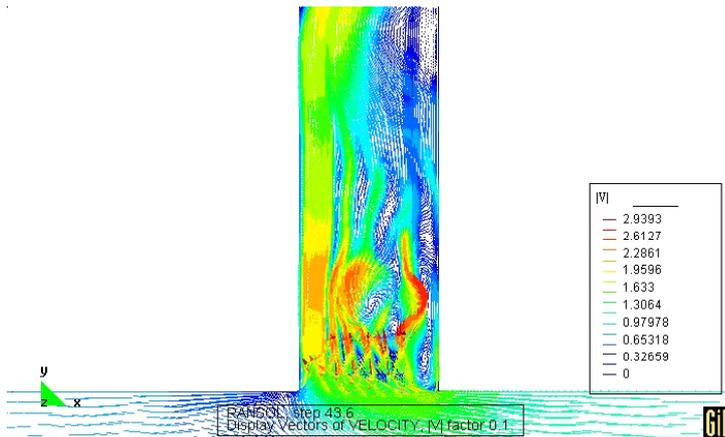


Fig. 13: Contornos rellenos del módulo de la velocidad instantánea cercano a la entrada.

Caso 3: Se observa una vorticidad aún más débil que en el caso anterior, en el primer tramo de la camisa, tendiendo a uniformarse a una altura de igual a tres diámetros de la sección de succión. Se mantienen velocidades altas sobre la pared aguas arriba de la camisa. También coincidente en rasgos generales con los resultados del modelo físico (ver Figs. 14 y 15).

Caso 4: Mejoran las condiciones rápidamente en el sentido vertical, pero se mantienen las asimetrías, alta velocidad en las cercanías de la pared aguas arriba y vorticidad en las cercanías de la pared de aguas abajo. En este caso se mantiene la distribución asimétrica pero en una proporción mucho menor. De cualquier manera una bomba instalada en un flujo con estas condiciones sufrirá los inconvenientes del caso anterior, pero atenuados. En la Fig. 16 se observa el modelo bidimensional.

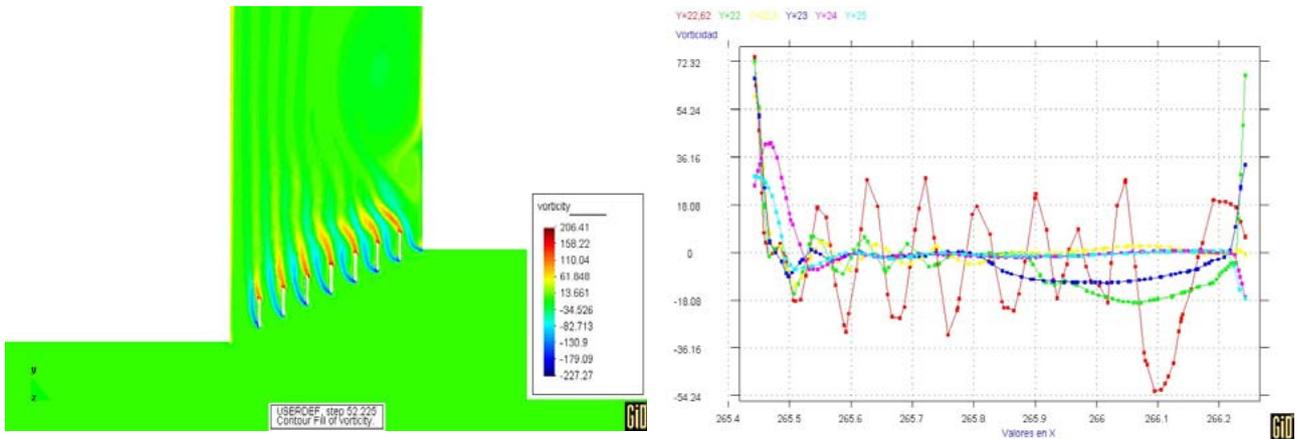


Fig. 14: Izq.: Contornos rellenos campo de vorticidad cercano a la entrada. Der.: Gráfica de vorticidad en varias secciones a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.6, 1.1, 1.6, 2.6, 3.6$ m.

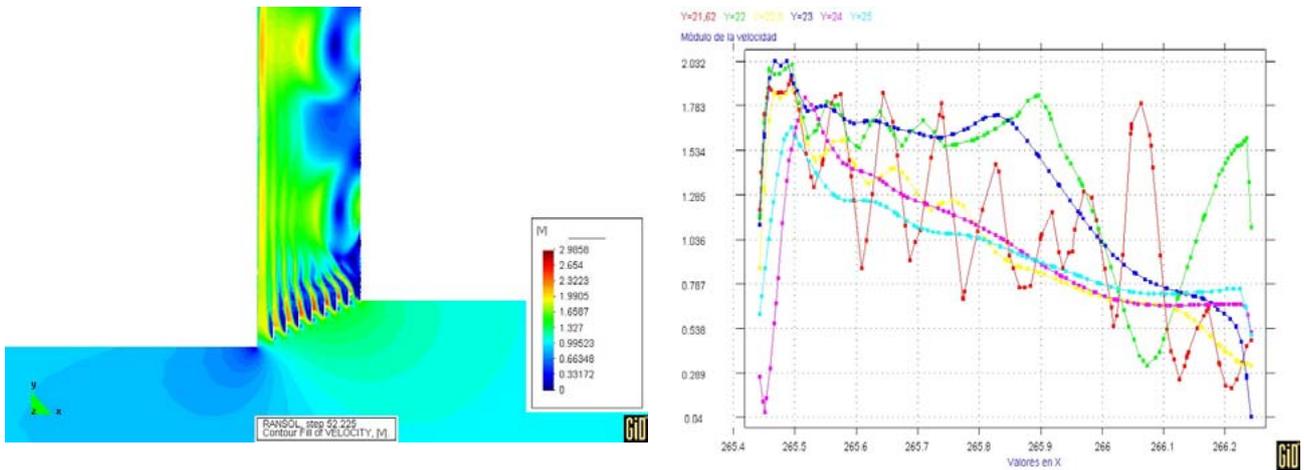


Fig. 15: Izq.: Contornos rellenos del módulo de la velocidad instantánea cercano a la entrada. Der.: Gráfica del módulo de velocidad instantánea en varias secciones a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.6, 1.1, 1.6, 2.6, 3.6$ m.

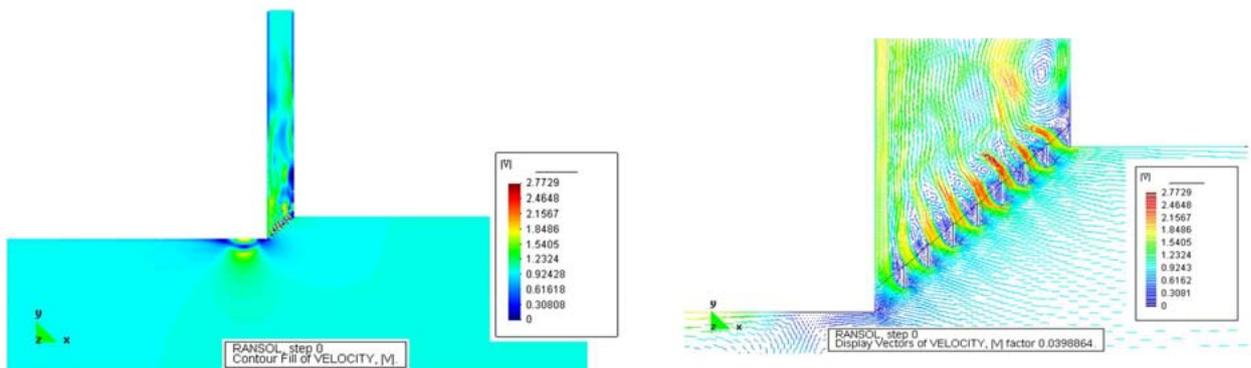


Fig. 16: Contornos rellenos del módulo de la velocidad instantánea.

Caso 5: Con este diseño se logra un alto grado de uniformidad en el flujo desde prácticamente el inicio de la columna vertical, insinuando solo en forma leve y en un área pequeña, velocidades bastante altas en la pared aguas arriba como así también vorticidad de eje horizontal sobre la pared aguas abajo. La distribución de velocidades resulta mucho más conveniente que en los casos anteriores. Si bien se genera una especie de ruido, dichas variaciones son menores al 10 % en relación a los valores medios; por otra parte, la distribución de caudales en el sentido de la corriente es bastante uniforme, salvo en los bordes. Las presentes condiciones del flujo son bastante adecuadas para la instalación de una bomba, considerando que el diámetro de la camisa deberá exceder en un 40 a 50 % el de la sección de entrada de la bomba. Las Figs. 17 y 18 muestran el modelo bidimensional con valores instantáneos de los campos anteriores.

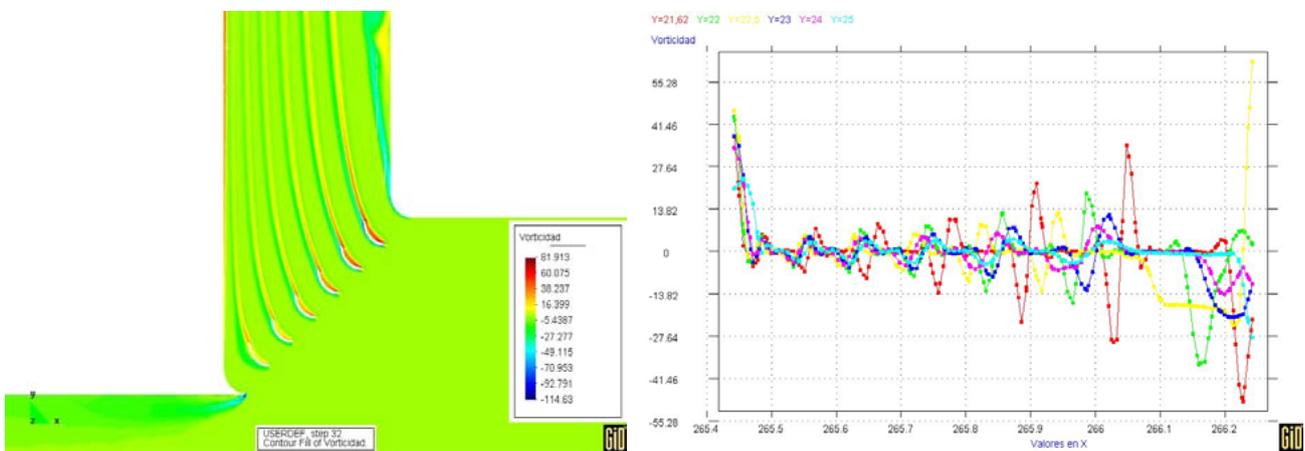


Fig. 17: Izq.: Contornos rellenos campo de vorticidad cercano a la entrada. Der.: Gráfica de vorticidad en varias secciones a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.6, 1.1, 1.6, 2.6, 3.6$ m.

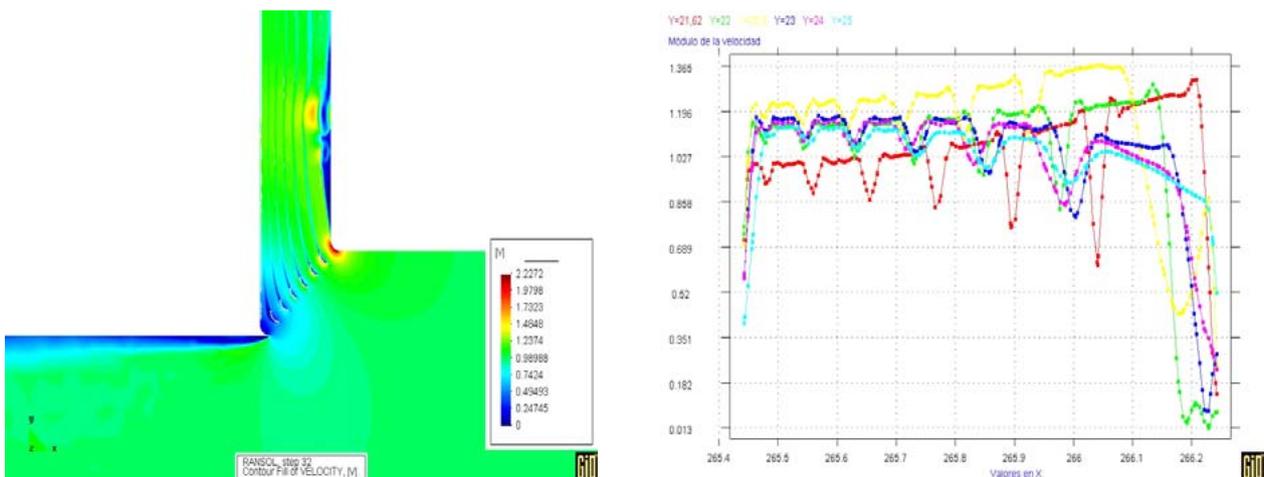


Fig. 18: Izq.: Contornos rellenos del módulo de la velocidad instantánea cercano a la entrada. Der.: Gráfica de módulo de velocidad en varias secciones a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.6, 1.1, 1.6, 2.6, 3.6$ m.

Las Figs. 21 muestra el campo de presión instantáneo y la Fig. 22 los gráficos de distribución de velocidad instantánea a diferentes alturas de la camisa en el modelo tridimensional.

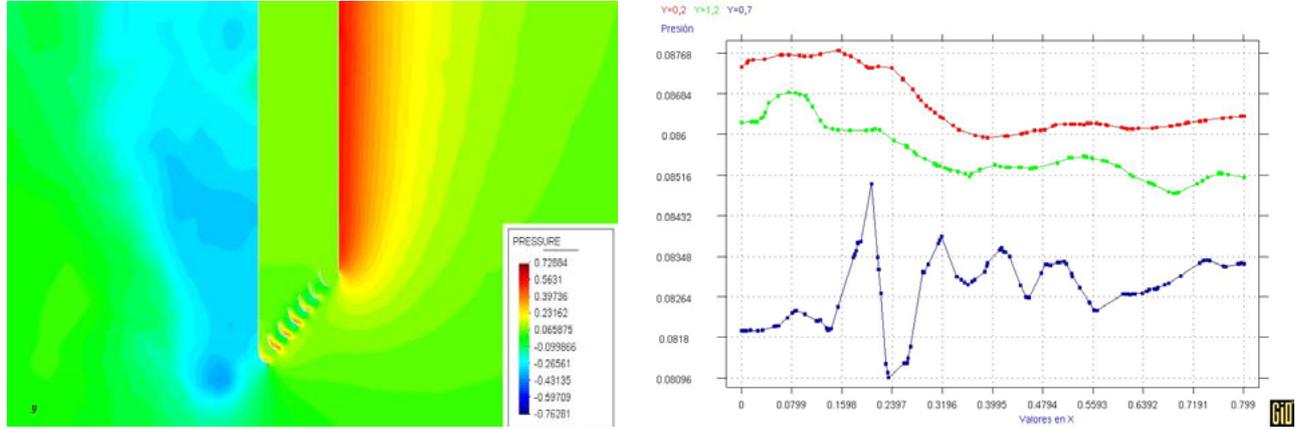


Fig. 21: Corte longitudinal. Izq.: Contornos rellenos del campo de presión cercano a la entrada. Der.: Gráfica de presión en varias secciones a diferentes alturas. Desde el borde entrada $y=0.2, 0.7, 1.2$ m

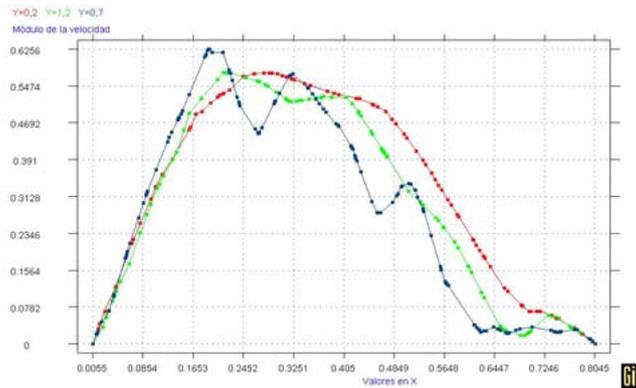


Fig. 22: Gráfica de módulo de velocidad instantánea en varias secciones a diferentes alturas: desde la entrada $y=0.2, 0.7, 1.2$ m.

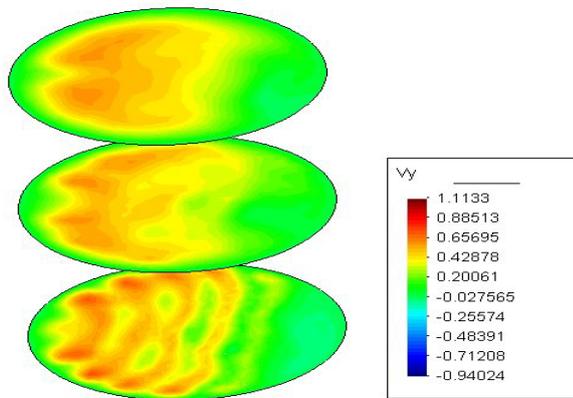


Fig. 23: Cortes transversales en la cañería. Contornos rellenos de la velocidad instantánea en el eje y (vertical). Desde el borde entrada $y=0.2, 0.7, 1.2$ m

10 CONCLUSIONES

La disposición de las bombas en camisa cilíndrica con sección de succión inclinada 45° , con deflectores curvos otorga un flujo suficientemente uniforme y libre de vórtices, que asegura una adecuada prestación de las bombas, acorde a sus condiciones de diseño y sin vibraciones. Por lo tanto se puede recomendar para las instalaciones de este tipo, la aplicación de tal disposición, con la salvedad de asegurar la llegada de flujo uniforme hacia la toma. Para definir los lineamientos y normas generales a seguir en el diseño de este tipo de instalación es necesario realizar la modelación matemática de numerosas variantes adicionales, que reflejen la interacción de una bomba con la estructura soporte y las demás bombas de la instalación, así como diversas variantes en relación a velocidades del flujo de aproximación, diámetros de camisa, inclinación de la sección de succión, forma y tamaño de los deflectores, entre otros.

La simulación numérica por medio de la interfase GiD y el módulo Tdyn otorga resultados satisfactorios, abriendo un amplio panorama para este estudio. Los mismos presentan una serie de magnitudes mucho más detalladas que en el modelo experimental, que si bien no se puede afirmar que son totalmente exactas, indican una conformación general muy similar al modelo hidráulico, por lo que le otorgan una confiabilidad aceptable para obtener conclusiones generales y definir formas geométricas convenientes del conducto de aproximación a la succión de las bombas. Por otra parte, como el abanico de variantes que es necesario estudiar es muy grande, la simulación numérica lo hace posible por la disminución en costo y tiempo. La presente fase de investigación ya permite realizar aplicaciones de sus resultados en los nuevos diseños de tomas de agua en muelle, lo que significa un avance importante en los objetivos buscados.

AGRADECIMIENTOS:

El presente trabajo se ha llevado a cabo en el Aula FICH-CIMNE de la UNL Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) y del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), a través de los paquetes de software GiD y Tdyn.

REFERENCIAS

- [1] Roberge, J.A., "Use of computational fluid dynamics (CFD) to model flow at pump intakes" Thesis Worcester Polytechnic Institute, Environmental Engineering May 1999.
- [2] Constantinescu, G.S. and V.C. Patel, 1997, Role of turbulence model in prediction of pump intake vortices, 10th International Conference on Numerical Methods, Swansea, UK.
- [3] Constantinescu, G.S., and V.C. Patel, 1998, "Numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 124, No. 2, Pp 123-134.
- [4] Dhillon, G.S., Sakhuja, V.S. and Paul, T.C., "Modeling Criteria for Vortex Formation at Pipe Intakes", Vol. V.XIX Congress IAHR Nueva Delhi, India, 1981.
- [5] GiD: A pre/post processing environment for generation of data and visualization in finite

- element analysis. CIMNE, Barcelona, 1996.
- [6] GID: The Personal Pre and Postprocessor, International, International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), URL: <http://gid.cimne.upc.es>
 - [7] CIMNE.GID online support. <http://www.gidhome.com/support>
 - [8] CIMNE.GID Reference Manual Versión 7, 2003
 - [9] Tdyn: A solver of equation Navier-Stokes. Referente Manual. 2001
 - [10] Tennekes H. And Lumley, J.L., A First Course in Turbulence, MIT Press (1972).
 - [11] Wilcox, D.C., Turbulence Modeling for CFD. DWC Industries, 2nd Edition, (1998).
 - [12] Rodi, W., Turbulence models and their application in hydraulics – a state of the art review. Institut für Hydromechanik and Sonderforschungsbereich, University of Karlsruhe, Germany, 1980.
 - [13] Smagorinsky, J. General Circulation model of the atmosphere. Mon. Weather Rev. , 91:99-164, 1963.
 - [14] Patel, V. C., Rodi, W. & Scheurer, G., Turbulence models for near-wall and low – Reynolds number flows: A review, AIAA J, Vol. 23, Nro.9, p1308, (1984).