

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELAJE DE VÓRTICES Y ARRASTRE DE AIRE PARA CONDICIÓN DE SUMERGENCIA CRÍTICA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE GURI

Presentado a la Ilustre Universidad Central
de Venezuela para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ingeniería
Hidráulica Por Ing. Montilla Castro,
Gonzalo A.

Caracas, julio 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELAJE DE VÓRTICES Y ARRASTRE DE AIRE PARA CONDICIÓN DE SUMERGENCIA CRÍTICA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE GURI

TUTOR: Prof. Luis Rojas Solórzano

Presentado a la Ilustre Universidad Central
de Venezuela para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ingeniería
Hidráulica Por Ing. Montilla Castro,
Gonzalo A.

Caracas, julio 2004

© **Montilla Castro, Gonzalo A. 2004**
Hecho el Depósito de Ley
Depósito Legal lf487200462724

VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y por el Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo de Grado presentado por el Ing. **Gonzalo A. Montilla Castro** portador de la Cédula de Identidad No. 12.070.065 titulado "**Modelaje de Vórtices y Arrastre de Aire para Condición de Sumergencia Crítica en la Central Hidroeléctrica de Guri**", a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al Grado de Magister Scientiarum en Ingeniería Hidráulica, dejan constancia de lo siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los Miembros del Jurado, éste fijó el día 2 de julio de 2004, a las 07:30 horas, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo cual éste hizo en el Instituto de Mecánica de Fluidos, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el Jurado, todo ello conforme a lo dispuesto en los Artículos 44, 49, 50, 51 y 52 del Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa pública del Trabajo, el Jurado decidió por **UNANIMIDAD, APROBARLO** por considerar, sin hacerse solidario de las ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

Para dar este veredicto el Jurado estimó que la obra examinada comprende un estudio riguroso e integrado de las áreas numérica y experimental de la Mecánica de los Fluidos, aplicadas a un problema de altísimo impacto en la generación de energía en Venezuela. Asimismo, el trabajo presentado se fundamenta en una extensa y valiosa revisión bibliográfica sobre el tema de la formación de vórtices y los efectos causados por éstos sobre turbinas hidráulicas. Los resultados presentados tienen una aplicación directa en la operación futura de la mayor y más importante central hidroeléctrica venezolana, como lo es Guri.

En fe de lo cual se levanta la presente Acta, en Caracas a los dos días del mes de julio de dos mil cuatro, dejándose también constancia de que conforme a lo dispuesto en la normativa jurídica vigente actuó como Coordinador del Jurado el Tutor Profesor **Luis Rojas Solórzano**


Prof. Pedro Solana Sánchez


Prof. Luis Miguel Suárez Villar


Prof. Luis Ramón Rojas Solórzano
Coordinador

DEDICATORIA

A mi Familia

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi mas sincero agradecimiento a los Ings. Arturo Marcano y Celso Castro quienes en representación del Departamento de Hidráulica de CVG EDELCA me brindaron la oportunidad de realizar este trabajo de grado. Igualmente quiero agradecer a los Drs. Luis Rojas Solórzano y C.Y. Wei quienes guiaron el presente trabajo. Asimismo, quiero resaltar el apoyo y colaboración de los Ingenieros, Técnicos y Obreros del Departamento de Hidráulica de CVG EDELCA quienes en todo momento me brindaron su apoyo.

Montilla C., Gonzalo A.

**MODELAJE DE VÓRTICES Y ARRASTRE DE AIRE PARA
CONDICIÓN DE SUMERGENCIA CRÍTICA EN LA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA DE GURI**

Tutor Académico: Prof. Luis Rojas Solórzano. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil. Año 2004, 99p.

Palabras Claves: Vórtice, Burbuja, Sumergencia, Turbina, Toma.

Resumen. La existencia de vórtices en las entradas de agua de turbinas son situaciones indeseables, debido a que los vórtices pueden inducir la succión de aire causando problemas operacionales en las máquinas hidráulicas y pueden arrastrar ocasionalmente elementos flotantes presentes en la superficie del agua hacia las rejas contra basura causando posibles daños. Considerando el período de sequía tan acentuado en Venezuela en el año 2001, el cual produjo el descenso del nivel de agua en el embalse de Guri y en vista que, en mayo del año 2003 estuvo a unos 22 m por debajo de su nivel máximo normal de operación, CVG EDELCA se ha visto en la necesidad de determinar hasta qué nivel puede llegar el embalse, sin que se presenten problemas en las turbinas Francis, mediante la simulación matemática bidimensional y el estudio e investigación en un modelo físico a escala 1:30. El modelo matemático FESWMS-2DH fue calibrado con el prototipo y sus resultados fueron utilizados como condiciones de borde del modelo físico. Las causas que originan la formación de vórtices fueron investigadas en la literatura. Análisis dimensionales y criterios de modelaje de vórtices fueron aplicados para diseñar el modelo físico. Las técnicas y criterios de modelaje de vórtices fueron investigados y los efectos de escalas fueron discutidos e implementados en los resultados. Observaciones desarrolladas en el prototipo sirvieron para calibrar el modelo físico. Los resultados muestran que los vórtices de superficie encontrados no arrastran aire, sin embargo las ranuras de la toma y las rejas contra basura juegan un papel fundamental en el arrastre de aire hacia la turbina.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
<hr/>	
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL	7
<hr/>	
2.1 Hidrodinámica del Embalse	7
2.2 Ecuaciones que Gobiernan el Movimiento	8
2.2.1 Coeficiente de Corrección de Momento Isotrópico β	10
2.2.2 Parámetro de Coriolis Ω	10
2.2.3 Esfuerzos Cortantes del Fondo τ_{bx} y τ_{by}	10
2.2.4 Esfuerzos de Corte en la Superficie del Agua τ_{wx} y τ_{wy}	11
2.2.5 Esfuerzos de Corte por Turbulencia	12
2.3 Método de Aproximación Numérica	13
2.4 Contornos y Condiciones de Borde	14
2.4.1 Contornos Sólidos	14
2.4.2 Bordes Abiertos	15
2.5 Convergencia y Calibración	16
2.6 Resultados	19
2.6.1 Caso 1	21
2.6.2 Caso 2	21
2.6.2 Caso 3	22

CAPÍTULO 3. MODELAJE HIDRÁULICO DE VÓRTICES	34
<hr/>	
3.1 Clasificación de los Vórtices	34
3.2 Efectos Perjudiciales	35
3.3 Medición de Vórtices	36
3.3.1 Circulación	37
3.3.2 Movimiento de Rotación de Fluido Dentro de la Toma	37
3.3.3 Coeficiente de Pérdidas en la Toma	38
3.3.4 Observación Visual	38
3.4 Requerimientos de Similitud	39
3.5 Criterios de Modelaje de Vórtices	41
3.5.1 Efectos Viscosos	43
3.5.2 Efectos de Tensión Superficial	45
3.5.3 Criterio de Igualación de Velocidades	47
3.6 Diseño y Construcción del Modelo Físico	48
3.6.1 Tanque Aguas Arriba	50
3.6.2 Reja Contra Basura	50
3.6.3 Toma de Casa de Máquinas 2	51
3.7 Instrumentación y Medición	52
3.7.1 Regulación de Caudal y Nivel	52
3.7.2 Velocidades	53
3.7.3 Presiones Piezométricas y Diferenciales	53
3.8 Calibración y Validación	54
3.8.1 Ubicación del Filtro Amortiguador	55
3.8.2 Turbulencia	57
3.8.3 Reja Contra Basura	60
3.8.4 Correlación de Vórtices	62
3.9 Resultados	63
3.9.1 Estudio Aguas Arriba de la Toma	64
3.9.2 Estudio Dentro de la Toma	68

CAPITULO 4. CONCLUSIONES**93**

REFERENCIAS**95**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No.		Pág.
2.1	Condición de aguas abajo para el escenario de calibración	16
2.2	Características de las mallas	17
2.3	Calibración del modelo matemático	19
2.4	Escenarios de simulaciones	20
2.5	Resultados	20
3.1	Criterios y estudios para evitar los efectos viscosos	45
3.2	Criterios y estudios para evitar los efectos de tensión superficial	47
3.3	Reynolds y Weber	55
3.4	Velocidades en el modelo aguas abajo del filtro amortiguador	57
3.5	Coefficiente de resistencia hidráulica para el rango de operación	60
3.6	Coefficiente de resistencia teórico	61
3.7	Registro histórico de vórtices en el prototipo	62
3.8	Resumen de ocurrencia de vórtices de superficie más significativas	67
3.9	Resumen de observaciones dentro de la toma	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.		Pág.
1.1	Comportamiento del nivel del embalse de Guri desde el año 2000	5
1.2	Vista general de la presa	5
1.3	Vista detallada de las estructuras principales de la presa de Guri	6
2.1	Vista general del embalse año 1999-Nivel del embalse 271 m.s.n.m.	23
2.2	Vista general del embalse año 1999-Nivel del embalse 245 m.s.n.m.	23
2.3	Malla de flujo en una descarga de fondo (Rouse, 1934)	24
2.4	Velocidad media en la vertical en las direcciones X y Y	24
2.5	Zona de simulación numérica para la malla de elementos finitos	25
2.6	Arreglo de elementos finitos	26
2.7	Bordes abiertos aguas arriba y aguas abajo	27
2.8	Variación de convergencia numérica de la malla M2	28
2.9	Variación de las velocidades	28
2.10	Comparación modelo-prototipo	29
2.11	Puntos de medición en el prototipo para la calibración	30
2.12	Caso 1	31
2.13	Caso 2	32
2.14	Caso 3	33
3.1	Clasificación del tipo de vórtice según “Alden Research Laboratory”	71
3.2	Variables que definen la formación de vórtices en tomas horizontales	71
3.3	Área de la toma representada en el modelo hidráulico	72
3.4	Plano de la toma en el modelo a escala 1:30	73
3.5	Vista general del modelo hidráulico a escala 1:30	74
3.6	Arreglo general de reja contra basura-prototipo y modelo	75

3.7	Disposición de rejas contra basura-prototipo y modelo	76
3.8	Esquema de regulación y medición de caudal	76
3.9	Esquema de monitoreo de nivel en el embalse	77
3.10	Esquema de medición de velocidades	77
3.11	Esquema de medición de presiones piezométricas	78
3.12	Esquema de medición de presión diferencial	78
3.13	Distribución de velocidades en el superficie a 1,22 m del filtro	79
3.14	Esquema teórico de la línea de energía piezométrica	80
3.15	Pérdidas de energía en la reja contra basura	80
3.16	Turbulencia del modelo a escala 1:30 de Guri	81
3.17	Coefficiente de resistencia hidráulica	81
3.18	Remolinos superficiales en la toma 11 (mayo 2003)	82
3.19	Remolinos y depresiones superficiales en la toma 11 (abril 2003)	82
3.20	Correlación en modelo-prototipo (observaciones marzo 1985)	83
3.21	Correlación en modelo-prototipo (observaciones abril 2003)	83
3.22	Curvas guías para evitar formación de vórtices (Knuss, 1978)	84
3.23	Aproximación en el modelo Caso 1, $Q_{\text{prot}}=500 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=240	84
3.24	Sumergencia crítica-Caso 1	85
3.25	Caso 1, no hay vórtices, $Q_{\text{prot}}=600 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=240	85
3.26	Caso 1, vórtices tipo 5 cuasi-permanentes, $Q_{\text{prot}}=1400 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=237	86
3.27	Arreglo de álabes móviles para simulación del Caso 2	86
3.28	Sumergencia crítica-Caso 2	87
3.29	Caso 2, vórtices tipo 6 cuasi-permanentes, $Q_{\text{prot}}=800 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=237	87
3.30	Caso 2, vórtices tipo 5 frecuentes, $Q_{\text{prot}}=1200 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=246	88
3.31	Arreglo de alabes móviles para simulación del Caso 3	88
3.32	Sumergencia crítica-Caso3	89
3.33	Caso 3, vórtices tipo 1 esporádico, $Q_{\text{prot}}=600 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=237	89
3.34	Caso 3, vórtices tipo 5 frecuente, $Q_{\text{prot}}=1000 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=255	90
3.35	Caso 3, vórtices tipo 6 permanente, $Q_{\text{prot}}=1400 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=255	90
3.36	Tren de ondas estacionarias	91
3.37	Elevación del agua en las ranuras de las compuertas	91

3.38	Vórtices por corte en las ranuras de las compuertas	92
3.39	Arrastre de aire	92

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La existencia de vórtices en las entradas de agua de turbinas y bombas son situaciones indeseables, debido a que los vórtices pueden inducir la succión de aire causando problemas operacionales en las máquinas hidráulicas y pueden arrastrar ocasionalmente elementos flotantes presentes en la superficie del agua hacia las rejillas contra basura causando daño en las unidades. Por esta razón es deseable que los efectos de formación de vórtices sean minimizados.

La formación de vórtices y succión de aire son fenómenos complejos de predecir por la gran cantidad de variables involucradas en su desarrollo. La geometría específica de la entrada y las condiciones aguas arriba y aguas abajo tienen grandes efectos sobre la formación de vórtices. Estas complicadas condiciones de borde, conjuntamente con su naturaleza inestable han hecho imposible desarrollar modelos matemáticos que representen en todo su espectro el fenómeno. Diversos investigadores han realizado experimentos que han determinado la sumergencia mínima requerida de tomas verticales y horizontales con diferentes geometrías y velocidades de descarga para que estuviesen libres de vórtices. Sus resultados indican que la ocurrencia de vórtices se incrementa a medida que la sumergencia disminuye ó cuando el ángulo de aproximación de las líneas de corriente a la toma es mayor. Por ejemplo, investigaciones realizadas por Chang (1979) y Dicmas (1978) sobre tomas de agua horizontales indican que la sumergencia crítica para la formación de vórtices está directamente relacionada con la velocidad en la entrada a la toma $(h/d)_{cr} = f(V)$, por lo tanto si la sumergencia del borde superior de la toma es insuficiente (o negativa) y si la velocidad del agua es suficientemente alta, se reúnen condiciones favorables para la formación de vórtices con la profundidad necesaria como para introducir burbujas o bolsas de aire al conducto. Similarmente, otros investigadores como Gordon (1970) y Amphlett (1976), desarrollaron varias fórmulas empíricas que vinculan la sumergencia de la toma con el número de Froude, en relación, al diámetro del conducto y la velocidad media del agua

$(h/d)_{cr} = f(Fr)$, para definir los bordes de la zona que presenta el peligro de formación de los vórtices y el arrastre de aire.

Tomando en consideración el período de sequía tan acentuado en Venezuela en el año 2001, el cual produjo el descenso acelerado del nivel de agua en el embalse de Guri y en vista que, en mayo del año 2003 estuvo a unos 22 m por debajo de su nivel máximo normal de operación (Figura 1.1), CVG EDELCA se ha visto en la necesidad de determinar con aceptable precisión hasta qué nivel mínimo del embalse es posible operar la Central, sin que se presenten problemas que puedan colocar en peligro las turbinas hidráulicas instaladas en la Casa de Máquinas 2.

En la zona Suroriental de Venezuela, en el Estado Bolívar, en el sitio conocido como Cañón de Nekuima sobre el Río Caroní a 95 Kms. aguas arriba de su confluencia con el Río Orinoco se encuentra la Central Hidroeléctrica de Guri (Raúl Leoni), con una potencia instalada de 9589 MW, lo cual satisface actualmente el 50% de la energía eléctrica de Venezuela. Fue construida en dos etapas, la primera donde se instalaron 10 unidades generadoras con un embalse a la cota 215,00 m.s.n.m. y una segunda etapa donde se elevó el nivel del embalse a la cota 271,00 m.s.n.m. y se añadieron 10 unidades generadoras en una segunda Casa de Máquinas (Figura 1.2 y 1.3), donde fueron construidas 8 tomas a la elevación 236,69 m.s.n.m. y dos a la elevación 219,69 m.s.n.m. (Apéndice 1) debido a los requerimientos de diseño (Gulliver, 1983). Cada una de estas unidades genera una potencia máxima de salida de 725 MW, con un caudal entre 300 y 600 m³/s y una caída neta máxima de 144 m para el nivel normal de operación, EL 270,0. El diseño de las tomas (Apéndice 1) contempla dos vanos rectangulares de 9,6 m de ancho por 23 m de altura con forma abocinada hidrodinámica, 3 ranuras en el techo conectadas a la atmósfera para accionar los tapones de mantenimiento y las compuertas de servicio y de emergencia. La toma es conectada a la tubería forzada de 10,5 m de diámetro mediante una transición curva hidrodinámica convergente de 29 m de radio.

Las tomas de las Unidades instaladas en la Casa de Máquinas 1 fueron diseñadas para la Etapa Inicial de Guri y su borde superior esta en la elevación 196,50 m.s.n.m. En Casa de Máquinas 2 existen dos tomas (13 y 14) cuyo borde superior esta ubicado a la elevación 219,69 m.s.n.m. (Figura 1.2) y las 8 restantes tienen el borde superior en la elevación 236,69 (tomas 11, 12 y 15 a la 20. Por lo anterior se estaría hablando de una

sumergencia crítica de las tomas 11, 12, 15 a la 20 de menos de 4 metros considerando que la elevación mínima de operación del embalse de Guri es la 240,00 m.s.n.m. según recomendaciones del constructor de la Central y de las turbinas, lo que sería una situación propensa a formar vórtices aguas arriba de la entrada de cada toma y a la succión de aire a través la tubería forzada.

Autores como Krivchenko (1986) y Mataix (1975), explican los fenómenos que ocurren al operar la turbomáquina con una mezcla agua-aire. Arrastradas por el flujo de agua, las bolsas de aire viajan hacia la turbina, comprimiéndose gradualmente. El agua con las bolsas de aire entran a la caja espiral con una velocidad (energía cinética) relativamente baja y una presión (energía potencial) considerablemente alta. Atravesando el distribuidor y el rodete, la velocidad del agua aumenta, la energía potencial se convierte en cinética haciendo girar el rodete, el cual transforma la energía hidráulica en energía mecánica. El agua abandona el rodete e ingresa al tubo de aspiración con una presión levemente sub-atmosférica (Krivchenko, 1986). En este proceso de descompresión rápida, las bolsas de aire comprimido se expanden, causando cuasi-explosiones, con efectos sumamente dañinos para la máquina. En la turbina se sienten fuertes vibraciones y pulsaciones de presión, y la entrega de la energía mecánica al generador sufre apreciables y dañinas oscilaciones (Mataix, 1975).

Con el desarrollo de este trabajo se examinarán los orígenes de la formación de vórtices y el arrastre de aire en las tomas de agua de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica de Guri, además de determinar hasta que nivel mínimo del embalse es posible operar sin problemas las unidades Turbo-generadoras de la Casa de Máquinas 2. Para lograr esto, la investigación estará orientada mediante las siguientes estrategias metodológicas: 1) Revisión de la Literatura: radicaré en obtener, extraer, recopilar y consultar la bibliografía y otros materiales que puedan ser útiles para el propósito del estudio. Esta revisión será selectiva, puesto que se elegirá la bibliografía más importante y reciente que, a juicio del investigador, mejor se adapte a las características del proyecto de investigación. 2) Estudio Exploratorio: la mayor parte de la literatura escrita sobre el tema de investigación gira alrededor de estudios simplificados de entradas de turbinas y específicamente el caso en estudio no ha sido abordado anteriormente de esta manera, por esta razón se adoptará la técnica exploratoria como un recurso para examinar el problema.

3) Estudio Descriptivo: el propósito fundamental de este tipo de estudio detallará situaciones y eventos tanto en el modelo matemático, físico y el prototipo; este análisis descriptivo busca especificar las propiedades importantes de la evolución hidráulica de los vórtices y su aparición en la geometría específica de la entrada de la toma. 4) Estudio Explicativo: irá más allá de la descripción del fenómeno hidráulico en estudio; estará dirigido a responder las causas de los eventos físicos que gobiernan el comportamiento de los vórtices y arrastre de aire dentro y fuera de la entrada de las unidades Turbo-generadoras bajo estudio.

Las estrategias metodológicas serán aplicadas una tras otra durante el desarrollo del proyecto de investigación. La evolución de la investigación involucra la aplicación de un Modelo Matemático Bidimensional y la construcción y estudio de un Modelo Físico a escala reducida.

Se aplicará un modelo matemático bidimensional de elementos finitos para el estudio del movimiento de la masa de agua del embalse y su influencia sobre las condiciones de aproximación de cada toma. Este modelo no podrá simular los vórtices debido a las características numéricas de las ecuaciones utilizadas, sin embargo servirá para determinar el ángulo de incidencia de las líneas de corriente en las zonas próximas a las tomas, donde la hidrodinámica del embalse permite ser simulada bidimensionalmente con aceptable precisión, debido a que este ángulo podría inducir la pre-rotación del fluido y la formación de vórtices de superficie. Los resultados serán utilizados como condición de borde en el modelo físico a escala 1:30. Allí se analizará la interacción de la geometría específica de las tomas con la dinámica de la superficie libre del agua, tomando en consideración los efectos de escala y los criterios teóricos y básicos en el modelaje de vórtices para definir el rango de operación de las turbinas Francis para condición de sumergencia crítica.

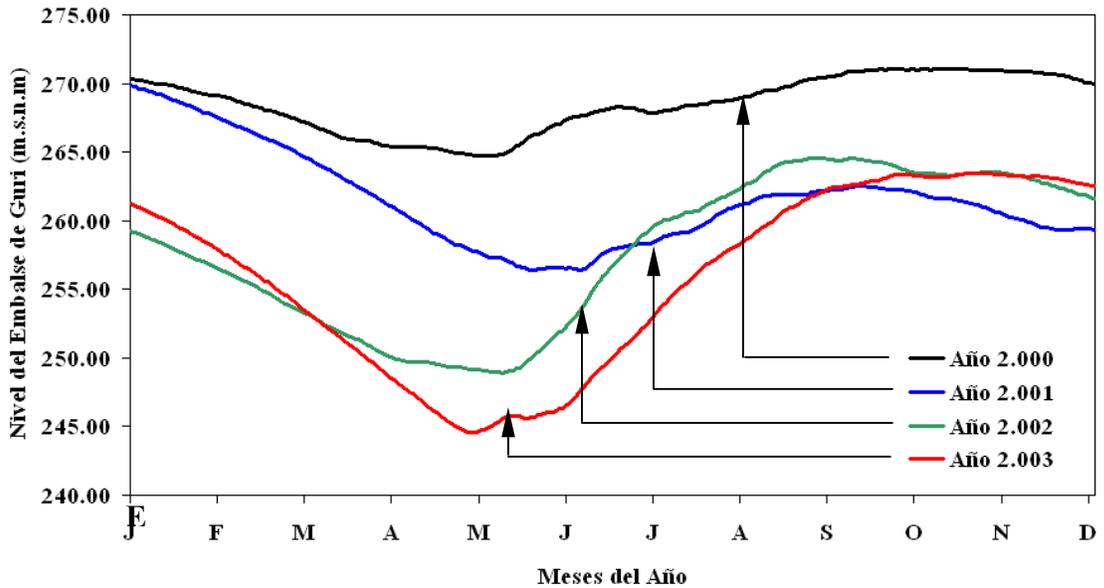


FIGURA 1.1.- Comportamiento del nivel del embalse de Guri desde el año 2000

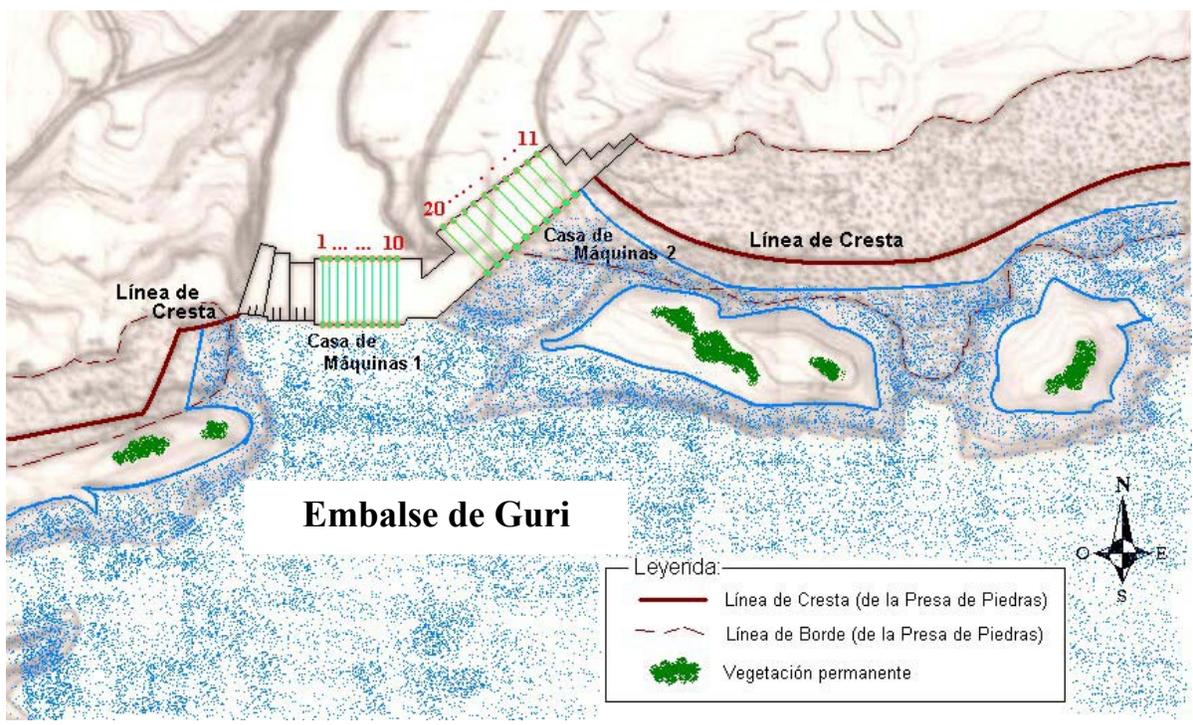


FIGURA 1.2.- Vista general de la presa

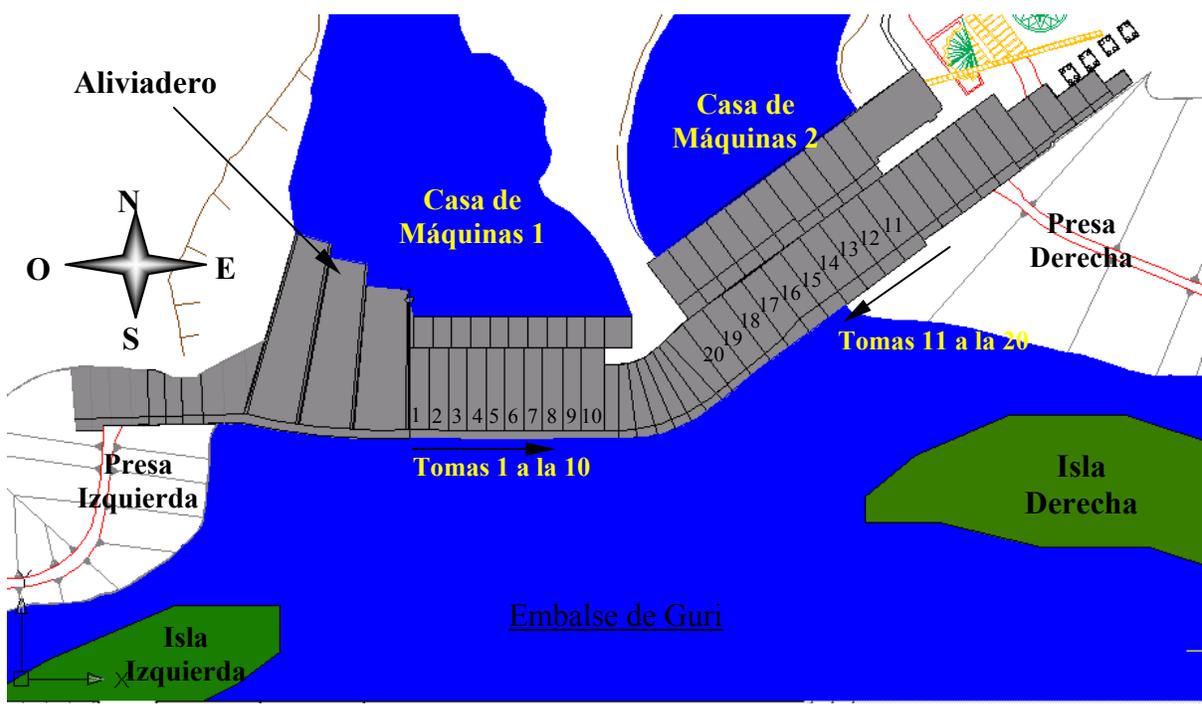


FIGURA 1.3.-Vista de detallada de las estructuras principales de la presa de Guri

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS BIDIMENSIONAL

2.1 HIDRODINÁMICA DEL EMBALSE

Las ecuaciones que describen el flujo en planicies de inundación, estuarios, embalses, y otros cuerpos de agua se basan en los conceptos de la conservación de la masa y el momento. En muchos problemas prácticos de ingeniería la naturaleza tridimensional del flujo queda desplazada a un segundo plano, particularmente cuando la relación entre el ancho y la profundidad del cuerpo de agua es grande.

El embalse de Guri (Figura 2.1) para el nivel máximo de operación posee una superficie de agua de 3919 Km² y su profundidad máxima puede alcanzar los 135 m.

Para la época de verano el embalse reduce su superficie y la relación mínima de ancho y profundidad es 7,0, conformado por numerosas islas arenó arcillosas. La hidrodinámica de las líneas de corriente únicamente se ve afectada por la interacción de las islas con el flujo de agua, sin embargo las características quasi-bidimensionales del cuerpo de agua permanecen iguales tanto en aguas bajas como en aguas altas, debido a que el comportamiento hidráulico es relativamente plano. En la Figura 2.2 se aprecia una vista general del embalse de Guri en época de verano, donde se observa la aproximación a las tomas y las islas que han aflorado producto del descenso del embalse.

En estos casos, la cuantificación del flujo en el plano horizontal puede ser el principal punto de interés, y la aproximación bidimensional del flujo puede ser utilizada como una ventaja computacional para simular el comportamiento del flujo con razonable precisión. Simulaciones matemáticas bidimensionales realizadas por Wei (1991) demostraron que para una relación de ancho y profundidad de 3,3, las características hidrodinámicas del flujo de aproximación adquirirían el mismo comportamiento hidráulico que el modelo físico a escala 1:36. Adicionalmente, simulaciones matemáticas

bidimensionales realizadas por el Dpto. de Hidráulica-CVG EDELCA (2003) sobre el embalse del Brillante pudieron definir una mejor aproximación al aliviadero principal.

Independientemente de la operación de las turbinas, el comportamiento del flujo en el embalse y la zona de aproximación es relativamente horizontal excepto en las zonas cercanas a las tomas de las turbinas de las Casas de Máquinas 1 y 2, donde el comportamiento de las líneas de corriente es completamente tridimensional debido a la distorsión de las líneas de flujo (Figura 2.3) en el volumen de influencia de las tomas y a la interacción hidrodinámica entre una y otra. Por lo tanto, reconociendo la bidimensionalidad del sistema y el comportamiento local tridimensional del flujo, fue seleccionado un modelo matemático bidimensional de elementos finitos para simular con considerable precisión el comportamiento de las líneas de corriente en las zonas aguas arriba de la Casa de Máquinas 2.

2.2 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL MOVIMIENTO

Para el estudio se utilizó el modelo FESWMS-2DH (Finite Element Surface Water Modeling System-2DH), el cual es un programa matemático bidimensional de elementos finitos escrito en FORTRAN. Este modelo fue desarrollado por El Departamento de Transporte de Los Estados Unidos a través de la Administración Federal de Carreteras con el propósito de analizar el flujo en los cruces de carretera donde las condiciones hidráulicas son bidimensionales. Con la profundidad y las componentes de la velocidad promedio en la vertical como incógnitas, el modelo de elementos finitos proporciona flexibilidad en la descripción topográfica de la región en estudio tales como, los bordes del cuerpo de agua, canales, islas, diques, y estribos.

El modelo resuelve las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el movimiento bidimensional de la superficie del agua en el plano horizontal. Estas ecuaciones son deducidas de las ecuaciones de movimiento y continuidad para una columna de agua extendida desde la superficie libre hasta el fondo del cuerpo de agua, donde la presión del agua se asume hidrostática para el flujo horizontal y los esfuerzos de fricción del fondo son expresados en términos de la Ley de Resistencia de Manning.

Las componentes media de la velocidad en el plano horizontal X y Y se definen como:

$$U = \frac{1}{H} \int_{Z_b}^{Z_w} u dz \quad V = \frac{1}{H} \int_{Z_b}^{Z_w} v dz \quad (2.1)$$

Donde H es la profundidad del agua, Z es la dirección vertical, Z_b es la elevación del fondo, $Z_w = Z_b + H$ es la elevación de la superficie del agua, u es la velocidad horizontal en un punto de la vertical en la dirección X y v es la velocidad horizontal en un punto de la vertical en la dirección Y . La Figura 2.4 muestra las variables involucradas y la velocidad media del flujo en la vertical.

Las ecuaciones que describen el movimiento de flujo con superficie libre se basan en la integración de las ecuaciones tridimensionales de la conservación de la masa y la cantidad de movimiento con respecto a la coordenada vertical desde el fondo hasta la superficie del agua, considerando despreciables las componentes de la velocidad y la aceleración en la dirección vertical.

La ecuación diferencial parcial de conservación de la masa o ecuación de continuidad para flujo incompresible y régimen permanente se muestra a continuación:

$$\frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

Donde HU es el caudal unitario en la dirección X , HV es el caudal unitario en la dirección Y .

La ecuación (2.2) se deduce realizando un balance de flujo másico en un elemento infinitesimalmente pequeño, considerando la densidad del agua ρ constante y la independencia de sistema con respecto al tiempo.

La ecuación del momento en las direcciones X y Y , es deducida realizando un balance de fuerzas en un elemento infinitesimalmente pequeño, considerando la densidad del agua ρ constante y la independencia de sistema con respecto al tiempo. A continuación se muestra la ecuación diferencial parcial de conservación del momento:

$$\frac{\partial \beta HU U}{\partial x} + \frac{\partial \beta HUV}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{g}{2} \frac{\partial H^2}{\partial x} - \Omega HV + \frac{1}{\rho} \left(\tau_{bx} - \tau_{wx} - \frac{\partial H \tau_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial H \tau_{xy}}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \beta HVU}{\partial x} + \frac{\partial \beta HVV}{\partial y} + gH \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{g}{2} \frac{\partial H^2}{\partial y} - \Omega HU + \frac{1}{\rho} \left(\tau_{by} - \tau_{wy} - \frac{\partial H \tau_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial H \tau_{yy}}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.4)$$

Donde β es el coeficiente de corrección del momento isotrópico el cual considera la variación de la velocidad en la dirección vertical, g es la aceleración gravitacional, ρ es la

densidad del agua, Ω es el parámetro de Coriolis, τ_{bx} y τ_{by} son los esfuerzos cortantes en el fondo actuando en las direcciones X y Y , respectivamente, τ_{wx} y τ_{wy} son los esfuerzos cortantes en la superficie del agua en las direcciones X y Y , respectivamente, y τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yy} son esfuerzos cortante por causa de la turbulencia donde, por ejemplo, τ_{xy} es el esfuerzo cortante actuando en la dirección X en el plano perpendicular a la dirección Y .

2.2.1 Coeficiente de Corrección del Momento Isotrópico β

El perfil de velocidades en la dirección vertical puede ser aproximado por la función logarítmica (2.5):

$$u = \frac{\sqrt{C_f} U}{\kappa} \log_e \left(\frac{Z - Z_b}{k} \right) \quad (2.5)$$

Donde C_f es el coeficiente de fricción del fondo, κ es la constante de Von Karman, y k es la rugosidad. El coeficiente de corrección del momento viene dado por la expresión (2.6), sin embargo, FESWMS calcula el coeficiente β como se muestra la ecuación (2.7):

$$\beta = 1 + \frac{C_f}{\kappa^2} \quad (2.6)$$

$$\beta = \beta_0 + C_\beta C_f \quad (2.7)$$

Donde β_0 y C_β son coeficientes especificados por el usuario. Por ejemplo, $C_\beta=6,25$ y $\beta_0=1$ se utilizan para representar flujos en canales abiertos y $C_\beta=0$ y $\beta_0=1$ se aplica cuando se considera que las variaciones de la componente vertical de la velocidad son despreciables.

2.2.2 Parámetro de Coriolis Ω

Los efectos de la rotación de la tierra en el movimiento del agua son tomados en consideración por el parámetro de Coriolis ($\Omega=2\omega \sin \phi$) en la ecuación de conservación del momento. Donde ω es la velocidad de rotación de la tierra ($7,27 \cdot 10^{-5}$ rad/s), y ϕ es el ángulo de la latitud. Este ángulo es positivo en el Hemisferio Norte y negativo en el Hemisferio Sur. El FESWMS utiliza un valor constante del parámetro de Coriolis, sin embargo, este parámetro puede ser despreciable en el caso donde la relación entre la extensión de área en el plano horizontal y la profundidad es grande.

2.2.3 Esfuerzos Cortantes del Fondo τ_{bx} y τ_{by}

Las componentes de los esfuerzos de corte son calculados utilizando las expresiones (2.8):

$$\tau_{bx} = \rho C_f m_b U \sqrt{U^2 + V^2} \quad \tau_{by} = \rho C_f m_b V \sqrt{U^2 + V^2} \quad (2.8)$$

Donde m_b es un factor que se considera para incrementar los esfuerzos de corte por causa de la inclinación del fondo, expresión (2.9), y C_f es el coeficiente de fricción del fondo, expresión (2.10):

$$m_b = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z_b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z_b}{\partial y}\right)^2} \quad (2.9)$$

$$C_f = \frac{gn^2}{\phi^2 H^3} \quad (2.10)$$

Donde n es coeficiente de rugosidad de Manning, y $\phi=1$. FESWMS-2DH permite que la rugosidad del fondo varíe en función de la profundidad.

Esta variación puede ocurrir cuando existe vegetación sumergida o ramas de árboles en contacto con el flujo. Los coeficientes de rugosidad para canales naturales, construidos y planicies de inundación, pueden ser estimados utilizando las referencias Chow (1959) y Barnes (1967). Estos coeficientes han sido determinados mediante flujos de aproximación unidimensionales, los cuales implícitamente consideran los efectos de turbulencia y la desviación de la velocidad uniforme en la sección transversal. Sin embargo, la rugosidad del fondo debe ser determinada en el proceso de calibración mediante la comparación de los valores del prototipo con los del modelo matemático llegando a un proceso de ensayo y error donde la experiencia juega un papel primordial.

2.2.4 Esfuerzos de Corte en la Superficie del Agua τ_{wx} y τ_{wy}

Las componentes de los esfuerzos de superficiales en el agua por causa del viento son calculados por las expresiones (2.11):

$$\tau_{wx} = C_w \rho_a W^2 \cos \psi \quad \tau_{wy} = C_w \rho_a W^2 \sin \psi \quad (2.11)$$

Donde C_w es un coeficiente de esfuerzo superficial, ρ_a es la densidad del aire, W es la velocidad característica cerca de la superficie del agua, y ψ es el ángulo entre la dirección del viento y la dirección X . Los valores del coeficiente de esfuerzo superficial pueden ser seleccionados del US Department of Transportation-Manual (2002), y las características del viento deberán ser impuestas mediante mediciones sucesivas realizadas en el prototipo. Debido a las características del estudio la velocidad del viento es despreciable debido a que la hidrodinámica bidimensional del embalse predomina ante las condiciones del viento.

2.2.5 Esfuerzo de Corte por Turbulencia

El esfuerzo de corte causado por la presencia de turbulencia en el flujo es calculado utilizando el concepto de viscosidad de remolino o eddy Viscosity de Boussinesq, donde tanto los esfuerzos turbulentos como los viscosos se asumen proporcionales al gradiente de velocidades y son calculados utilizando las expresiones:

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad \tau_{yy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (2.12)$$

Donde ν_t es el valor de la viscosidad cinemática del remolino o también llamado coeficiente de turbulencia. En el algoritmo de solución del FESWMS-2DH, la viscosidad cinemática del remolino se asume como una propiedad isotrópica, es decir la turbulencia en las direcciones X y Y del movimiento son iguales. La viscosidad cinemática del remolino es relacionada con la difusión térmica turbulenta Γ_t según la expresión siguiente:

$$\Gamma_t = \frac{\nu_t}{\sigma_t} \quad (2.13)$$

Donde σ_t es una constante empírica llamada número de Prandtl por difusión térmica.

Muchos estudios experimentales llevados a cabo en laboratorios con trazadores en canales abiertos (Fischer, 1979) han demostrado que los valores adimensionales de la difusión, $e^* = \Gamma_t / U_* H$, usualmente están entre 0,1 y 0,2 para canales rectos y uniformes, y para canales curvos con irregularidades en las paredes estos valores aumentan. Los valores de e^* en canales naturales siempre son menores que 0,4. El número de Prandtl, σ_t , asociado a experimentos de transferencia de calor y masa, varía desde 0,5, en flujo sin esfuerzos cortantes, hasta 0,9, para flujo cerca de las paredes. Asumiendo que el intercambio

turbulento de calor y momento son similares, entonces la viscosidad cinemática del remolino en canales abiertos puede ser relacionada con la velocidad de corte y la profundidad según la expresión (2.14):

$$\nu_t = (0,6 \pm 0,3)U_*H \quad (2.14)$$

Donde los valores grandes representan canales con curvas cerradas y cambios rápidos de la geometría. El FESWMS-2DH, calcula la viscosidad cinemática del remolino utilizando la fórmula (2.15):

$$\nu_t = \nu_0 + C_{\mu 1}u_*H + C_{\mu 2}|J|\sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)^2} \quad (2.15)$$

Donde ν_0 es la viscosidad cinemática básica del remolino, $C_{\mu 1}$, $C_{\mu 2}$ son coeficientes adimensionales, $|J|$ el determinante de la matriz jacobiana de elementos finitos de transformación de coordenadas. Para canales naturales usualmente se utiliza $C_{\mu 1}=0,6$, $C_{\mu 2}=0$ y $\nu_0=0$. Sin embargo, para la simulación de la turbulencia en ríos grandes y embalses, es necesario asignar valores positivos de la viscosidad cinemática del remolino mediante la calibración de la malla de elementos finitos ante el prototipo.

2.3 MÉTODO DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA

El método de aproximación numérica empleado para resolver las ecuaciones que gobiernan el movimiento es el Método de los Elementos Finitos. Este método contiene procedimientos numéricos para resolver las ecuaciones diferenciales parciales encontradas en problemas de física e ingeniería. Originalmente desarrollado para analizar estructuras, este método fue creado como una herramienta efectiva para evaluar una gran variedad de problemas en el campo de los medios continuos y es a partir de estas últimas dos décadas cuando se ha utilizado para resolver problemas de flujo con superficie libre.

El FESWMS-2DH utiliza el Método de los Elementos Finitos de Galerkin (Institute of Computer Science, 2004) para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el movimiento del fluido en dos dimensiones. El procedimiento comienza por dividir el área de interés en sub-regiones, las cuales son llamadas elementos. Un elemento puede ser de forma triangular o rectangular, y es definido por un número finito de nodos situados en el borde o en el interior de cada elemento, los cuales son identificados

tomando en consideración la conexión entre los elementos de la malla. La interpolación mixta es utilizada por el FESWMS-2DH, la cual consiste en la aplicación de funciones de interpolación cuadrática para interpolar la velocidad media y de funciones lineales para interpolar la profundidad.

El método de los residuales pesados es aplicado a las ecuaciones diferenciales que gobiernan el movimiento en cada elemento. Aproximaciones de las variables dependientes son sustituidas dentro de las ecuaciones de conservación de la masa (2.2) y el momento (2.3 y 2.4), las cuales generalmente no son satisfechas exactamente, formando los residuales. Estos residuales están sujetos a desaparecer cuando ellos son multiplicados por una función de peso W_i y sumadas a cada punto en la solución del dominio. En el método de Galerkin, las funciones de peso son iguales a las funciones de interpolación. Para minimizar el error ε la sumatoria de los residuos ponderados es expresada en forma integral e igualada a cero y las ecuaciones resultantes son resueltas mediante el método iterativo de Newton.

El resumen expuesto en los párrafos anteriores describe de manera básica y conceptual el procedimiento numérico implícito dentro del algoritmo de solución del FESWMS-2DH, sin embargo, en el US Department of Transportation-Manual (2004), se encuentra una explicación mas detallada del procedimiento numérico incorporado en el FESWMS-2DH para aproximar la solución.

2.4 CONTORNOS Y CONDICIONES DE BORDE

Las condiciones de borde y los contornos del modelo matemático deben ser especificadas en toda la frontera que compone la malla antes de comenzar la simulación numérica. El modelo necesita la definición de los esfuerzos tangenciales en los contornos sólidos, y el caudal y la elevación del agua en los bordes abiertos.

2.4.1 Contornos Sólidos

El contorno sólido está definido por la geometría específica de la región en estudio, el canal natural, la forma del embalse, las zonas de poca profundidad, las islas, las tomas, los diques, los estribos, y la topografía. El área que ocupa el embalse de Guri es sumamente extensa (es el segundo lago más grande de Venezuela después del lago de Maracaibo y más grande que el estado Carabobo) como para cubrir todas las zonas con una malla de

elementos finitos, considerando que el objetivo principal de esta simulación numérica es determinar el ángulo de incidencia de las líneas de corriente en las áreas adyacentes a las tomas y que el esfuerzo computacional ante la precisión de los resultados no justifica la inclusión de la totalidad del cuerpo de agua en la simulación matemática (Figura 2.5).

Planos topográficos de la condición natural del río Caroní a escala 1:50000 y planos batimétricos a escala 1:10000 fueron utilizados para alimentar la malla de elementos finitos (Apéndice 2). Se definió la elevación 244,00 como contorno sólido (Figuras 2.5 y 2.6), donde el caudal unitario normal a esta línea es igual a cero ($q_n=0$) y el esfuerzo de corte lateral es despreciable, validando la hipótesis de aguas poco profundas. En su totalidad el contorno del modelo comprende 98 Km² de superficie, correspondiente a 2,5% del área total del embalse.

2.4.2 Bordes Abiertos

Es el borde del modelo donde las líneas de flujo pueden entrar o salir de la malla de elementos finitos. Los valores que deben ser especificados dependen del tipo de borde (entrada o salida) y del tipo de flujo (subcrítico o supercrítico). Aguas abajo se estableció el caudal unitario normal (Figura 2.7b) de extracción de las turbinas (flujo subcrítico) representadas por 14 canales de pendiente constante que simulan las 20 tomas de Casa de Máquinas. Es importante acotar que en ningún momento se pretende representar las condiciones de flujo en las tomas debido a que estas corresponden a comportamientos hidráulicos enteramente tridimensionales los cuales serán analizados en el Capítulo 3.

Aguas arriba se estableció la elevación del nivel del agua (flujo subcrítico) considerando la hidrodinámica del sistema en estudio. Se estableció como límite aguas arriba (Figuras 2.6 y 2.7a) una sección a 18 Km de la presa de gravedad, donde existe un estrechamiento del cauce que distribuye las líneas de corriente quasi-perpendiculares a la sección transversal seleccionada como borde aguas arriba. Este límite seleccionado, garantiza que la distribución unitaria del flujo en las zonas de interés no se vea afectada por la hipótesis de borde aguas arriba donde se asume la elevación del agua y flujo uniforme en toda la sección transversal.

La Tabla 2.1 muestra los caudales de calibración del modelo matemático, donde existen 12 tomas funcionando con el nivel del embalse a la elevación 263,00 m.s.n.m. Estos

datos serán utilizados en la Sección 2.5 para analizar la convergencia y evaluar la calibración de las mallas de elementos finitos.

TABLA 2.1.- Condición de borde aguas abajo para el escenario de calibración.

Toma No.	Q_{cal} (m³/s)	Toma No.	Q_{cal} (m³/s)
1	0,0	11	0,0
2	149,9	12	463,3
3	0,0	13	476,7
4	0,0	14	477,1
5	0,0	15	0,0
6	0,0	16	459,3
7	272,4	17	0,0
8	0,0	18	463,5
9	274,0	19	490,8
10	277,6	20	444,2
ΣQ	973,9	ΣQ	3274,9

Es importante acotar que las condiciones de borde abierto son fundadas en la hipótesis de establecer flujo subcrítico tanto aguas abajo como aguas arriba de la malla de elementos finitos. La Figura 2.7a muestra la forma de la malla en el borde abierto aguas arriba, donde se observa un canal de 163 m de ancho por 3 Km de longitud de pendiente suave lo cual garantiza una distribución de flujo uniforme en la entrada de caudal unitario del modelo matemático. La Figura 2.7b muestra el borde aguas abajo, el cual incluye las tomas (simuladas como canales) de las turbinas y la disposición de los elementos en la malla.

2.5 CONVERGENCIA Y CALIBRACIÓN

Fueron elaboradas tres diferentes mallas de elementos finitos utilizando el módulo de construcción de mallas bidimensionales del programa SMS v8.0 “Surface Modeling System v8.0” (Environmental Modeling System Inc., 2004). La convergencia numérica fue

analizada, variando el factor de relajación ω_r del método iterativo de Newton con el propósito de estudiar las mallas en la región de convergencia absoluta. La Tabla 2.2 muestra las características de cada malla, el número de iteraciones que invierte el programa en alcanzar la convergencia absoluta y la desviación máxima del caudal unitario en la región de convergencia absoluta.

TABLA 2.2.- Características de las mallas.

Malla No.	Número de Elementos	Número de Nodos	Iteración de Convergencia	ω_r	Δq_{\max} (m ² /s)	% Δq_{\max}
M1	4551	19946	32	0,6	0,25	0,96
M2	5056	21381	18	0,6	0,13	0,50
M3	5661	23100	17	0,6	0,12	0,45

Se utilizó un computador personal con procesador Pentium III de 866 MHz con 256 MB de RAM, el tiempo de cálculo numérico para 50 iteraciones fue de 1 hr. 55 min. para M1, 2 hr. 10 min. para M2 y 2 hr. 26 min. para M3, utilizando 30 MB de la memoria RAM. La desviación máxima permitida para garantizar la convergencia absoluta de los cálculos se estableció en 1% correspondiente al caudal unitario de 0,26 m²/s ($\Sigma Q=4248,8$ m³/s) en el escenario de calibración planteado en la Tabla 2.1.

La Figura 2.8 muestra las curvas de convergencia de la malla M2, utilizando los criterios de sub-relajación del método iterativo de Newton. Los resultados demuestran que la convergencia numérica es muy buena y el factor de relajación (sub-relajación) óptimo es de $\omega_r=0,6$. Cuando se sub-relaja mucho, la convergencia avanza con menos rapidez pero en general existen menos fluctuaciones que cuando se sub-relaja menos. La Figura 2.9 muestra la diferencia de velocidades entre las mallas en una sección de control ubicada a 120 m aguas arriba de la presa de gravedad en el modelo matemático; la diferencia no supera los 0,0001 m/s.

Observaciones en el prototipo fueron realizadas con la finalidad de calibrar las mallas de elementos finitos (Tabla 2.2). Trazadores flotantes fueron empleados para verificar el flujo de recirculación existente en la zona Noroeste del prototipo. Allí se puede percibir (Figura 2.10a) un flujo de retorno producto de la separación de las líneas de

corriente que se dirigen hacia las tomas de la Casa de Máquinas 1, cuya intensidad aumenta a medida que el embalse desciende. Simulaciones realizadas en el modelo matemático pudieron reproducir la recirculación en esta zona (Figura 2.10c).

Adicionalmente, la simulación del modelo confirmó la existencia de circulación lenta en la zona Noreste del proyecto (Figura 2.10b y 2.10c) y el movimiento paralelo de las líneas corriente a la isla derecha.

Mediciones de velocidad media en el plano horizontal fueron realizadas con el propósito de garantizar la calibración total del modelo matemático con valores de campo. Se tomaron siete puntos de medición (P1 al P7) en el prototipo en las zonas adyacentes a las islas izquierda y derecha (Figura 2.11) donde la profundidad del agua no supera los 35 m, debido a que el equipo empleado para realizar la operación es un perfilador de flujo por efecto Doppler tridimensional el cual posee limitaciones inherentes al sondeo en aguas profundas mayores a los 35 m (RD Instruments, 2003).

La dirección de los vectores velocidades en el prototipo están identificados con el color azul y en el modelo en color negro (Figura 2.11). La calibración es un proceso iterativo de ensayo y error, donde se modifican los parámetros y coeficientes que definen el movimiento bidimensional del fluido (Ecuaciones 2.3 y 2.4). El resultado final de este proceso se muestra a continuación: Coeficiente de Corrección del Momento Isotrópico, $C_\beta=0$ y $\beta_0=1$, Parámetro de Coriolis, $\Omega=0$, Coeficiente de rugosidad de Manning, $n=0,065$, Coeficiente de esfuerzo superficial, $C_w=0$, Viscosidad cinemática básica del remolino $\nu_0=5,0\text{m}^2/\text{s}$ y los Coeficientes adimensionales, $C_{\mu 1}=0,6$, $C_{\mu 2}=0$.

La Tabla 2.3 muestra la comparación de los valores obtenidos en la calibración del modelo y los valores medidos en el prototipo. La diferencia porcentual en las velocidades no supera el 15%, salvo en los puntos P3 y P7 donde la diferencia es de 19 y 25% respectivamente, sin embargo la dirección de las velocidades refleja diferencias menores a los 15 grados (4%). Los valores obtenidos en el proceso de calibración son muy buenos y se podría concluir que las mallas M1, M2 y M3 representan el comportamiento hidrodinámico del embalse y de la zona de aproximación a las Casas de Máquinas con razonable precisión. Sin embargo, tomando en consideración la convergencia numérica se seleccionó la malla M2 de 5056 elementos para simular los escenarios planteados en los resultados.

TABLA 2.3.- Calibración del modelo matemático.

Punto No.	Modelo		Prototipo		Diferencia	
	Vel. (m/s)	Dir. (Grado)	Vel. (m/s)	Dir. (Grado)	% Δ Vel.	Δ Dir. (Grado)
P1	0,018	283,6	0,021	298,5	-14,2	-14,9
P2	0,017	290,0	0,019	305,0	-10,5	-15,0
P3	0,017	288,9	0,021	299,1	-19,0	-10,2
P4	0,020	283,0	0,023	283,0	-13,0	0,0
P5	0,027	293,7	0,03	305,0	-10,0	-11,3
P6	0,040	12,3	0,037	8,0	8,0	4,3
P7	0,025	8,6	0,020	350,0	25,0	10,6

2.6 RESULTADOS

La evaluación del comportamiento hidrodinámico de la zona en estudio, simulaciones realizadas bajo distintos escenarios, comparación de los patrones del flujo de aproximación, observación de la distribución de las líneas de corriente en las adyacencias de las tomas en el modelo matemático bidimensional, conjuntamente con datos y consultas de la operación y disponibilidad de las turbinas de Guri, establecieron tres diferentes escenarios o casos de estudio, los cuales definen el universo de condiciones hidrodinámicas posibles (Tabla 2.4) aguas arriba de Casa de Máquinas 1 y 2.

Para simular los escenarios planteados en la Tabla 2.4, se escogió el nivel del embalse 245,00 m.s.n.m. el cual representa el comienzo del nivel crítico de emergencia para las tomas de Casa de Máquinas 2. Los resultados mostrados a continuación definirán las condiciones de bordes aguas arriba del modelo físico (Capítulo 3) por este motivo, en las Figuras 2.12b, 2.13b y 2.14b se muestra el área correspondiente al modelo físico en las simulaciones matemáticas bidimensionales.

TABLA 2.4.- Escenarios de simulaciones.

Toma No.	Q_{caso1} (m³/s)	Q_{caso2} (m³/s)	Q_{caso3} (m³/s)	Toma No.	Q_{caso1} (m³/s)	Q_{caso2} (m³/s)	Q_{caso3} (m³/s)
1	232,0	274,0	0,0	11	0,0	0,0	0,0
2	232,0	274,0	150,0	12	0,0	470,0	463,0
3	270,0	277,0	0,0	13	0,0	0,0	478,0
4	272,0	280,0	0,0	14	0,0	0,0	477,0
5	270,0	0,0	0,0	15	470,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	16	0,0	480,0	460,0
7	275,0	272,0	272,0	17	0,0	480,0	0,0
8	272,0	0,0	0,0	18	464,0	464,0	463,0
9	276,0	274,0	274,0	19	498,0	498,0	490,0
10	278,0	277,0	277,0	20	440,0	480,0	444,0
ΣQ	2377,0	1928,0	973,0	ΣQ	1872,0	2872,0	3275,0

TABLA 2.5.- Resultados.

Punto No.	Prog. (m)	Prof. (m)	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
			Vel. (m/s)	Dir. (Grado)	Vel. (m/s)	Dir. (Grado)	Vel. (m/s)	Dir. (Grado)
1	5,2	79,3	0,070	2,1	0,057	9,6	0,227	34,7
2	20,5	79,4	0,059	4,7	0,061	13,8	0,200	33,5
3	37,7	79,1	0,058	4,2	0,072	8,9	0,186	33,8
4	54,1	78,5	0,056	346,8	0,082	1,4	0,175	32,1
5	67,0	77,1	0,050	332,9	0,095	354,6	0,166	28,1
6	88,2	75,9	0,042	327,9	0,098	342,9	0,162	22,6
7	105,1	74,5	0,028	317,9	0,099	331,1	0,163	17,2
8	122,8	68,1	0,016	308,9	0,087	324,5	0,163	9,8
9	138,0	57,3	0,008	307,1	0,085	324,0	0,165	0,6

Orientación de las tomas 324,5°

2.6.1 CASO 1

El 45% del caudal total es llevado hacia las tomas de Casa de Máquinas 2 mientras que el resto es conducido hacia la Casa de Máquinas 1. El escenario planteado representa una condición severa de operación para las turbinas de Casa de Máquinas 1, debido a que estarían funcionando el 90% de las turbinas, sin embargo constituye una condición probable y desde el punto de vista hidráulico genera una particular distribución de flujo en la toma No.15.

Las líneas de flujo llegan lateralmente a las tomas de Casa de Máquinas 2 (Suroeste) por causa de la isla derecha la cual se encuentra frente a la presa de gravedad y desvía los vectores velocidades hacia el centro del canal principal para luego dar un giro en dirección Noreste. En la Figura 2.12a se observa el flujo de recirculación lento en la zona Noreste, cercana a las tomas 11 y 12, la cual podría ser interpretada como una zona de estancamiento con velocidades medias menores a los 0,01m/s.

En la Figura 2.12b se muestra un acercamiento de la zona de aproximación a la toma No.15. El área definida por líneas continuas abarca 110 m aguas arriba de la Casa de Máquinas 2, y se puede apreciar que los vectores velocidad ingresan oblicuos a esta área para luego enderezarse en las inmediaciones de la toma donde las condiciones hidrodinámicas del flujo comienzan a ser tridimensionales. La magnitud y dirección de las velocidades medias sobre la línea punteada, ubicada a 70 m de la toma No.15, se muestran en la Tabla 2.5, y se puede observar que las velocidades mayores son del orden de los 0,070m/s (Punto 1) en el borde Oeste y disminuyen hacia el borde Este (Punto 9).

2.6.2 CASO 2

El 60% del caudal total es conducido hacia las tomas de Casa de Máquinas 2 y el 40% es llevado hacia la Casa de Máquinas 1. El escenario planteado representa una condición normal de operación para las turbinas de Casa de Máquinas 1 y 2, sin embargo debido a que la toma No.12 se encuentra funcionando en la zona Noreste del proyecto sin la influencia de tomas adyacentes constituye una condición hidráulica importante debida a las características hidrodinámicas inherentes a las líneas de corriente. Existe un flujo de

recirculación de poca velocidad cercano a la isla derecha debido a que las líneas de corriente se dirigen hacia la toma No.12 provocando la circulación agua en esta zona (Figura 2.13a).

Las velocidades de aproximación a la toma No.12 son similares en magnitud al Caso 3, sin embargo la orientación de los vectores tienden a alinearse con respecto a la orientación de la toma, donde se podría asumir que las líneas de flujo se aproximan cuasi-paralelas a la orientación de la toma. Las velocidades en el Punto 1 (Figura 2.13b) son del orden de los 0,077 m/s (borde Oeste), sin embargo disminuyen hacia el borde Este.

2.6.3 CASO 3

El 77% del caudal total es llevado hacia las tomas de Casa de Máquinas 2 mientras que el resto es conducido hacia la Casa de Máquinas 1. El escenario planteado representa una condición hidráulica similar a la utilizada para calibrar el modelo matemático, salvo que la elevación del agua es 245,00 m.s.n.m.

Las líneas de corriente se dirigen hacia las tomas 12, 13 y 14 (Figura 2.14a) por lo cual el flujo de recirculación en esta zona ha disminuido, en comparación al Caso 1, sin embargo persiste en el lado Oeste de la isla derecha una recirculación incipiente con velocidades de retorno inferiores a los 0,01m/s.

Las líneas de flujo que ingresan al área demarcada por líneas continuas (Figura 2.14b) lo hacen en dirección Noreste y los ángulos de aproximación de las líneas de flujo aguas arriba de la toma No.16 son mayores que en el Caso 1 (Tabla 2.5), influido por la operación de las tomas 12, 13 y 14, y las velocidades cruzan casi perpendicularmente el borde Oeste (Figura 2.14b). Las velocidades de aproximación a la toma No.16 son mayores que en el Caso 1 y las direcciones de las velocidades se tornan mas desviadas con respecto a la toma No.16.



FIGURA 2.1.- Vista general del embalse año 1999-Nivel del embalse 271 m.s.n.m



FIGURA 2.2.- Vista General del embalse año 2003-Nivel del embalse 245 m.s.n.m

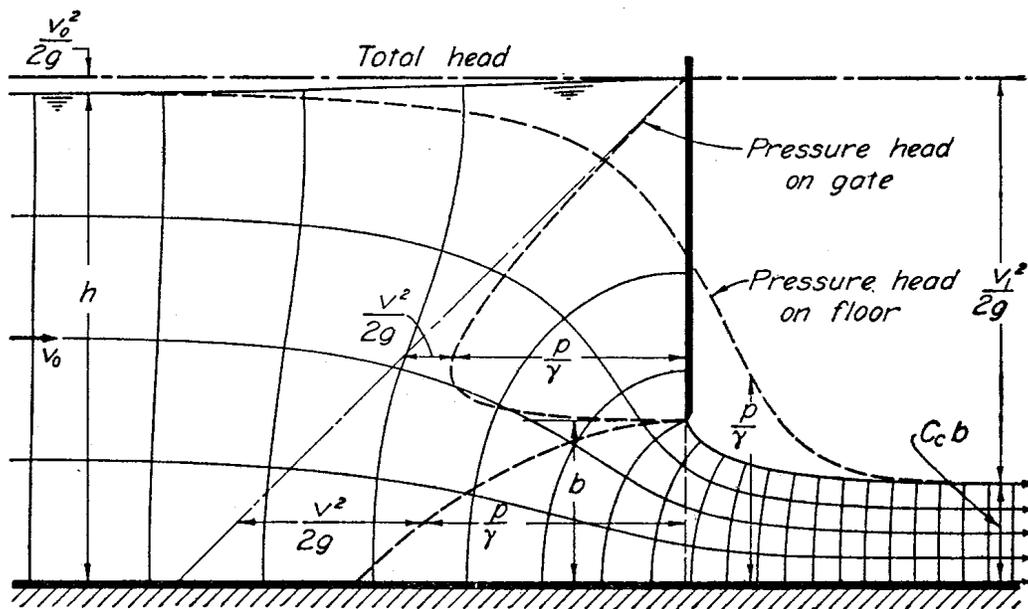


FIGURA 2.3.- Malla de flujo en una descarga de fondo (Rouse, 1951)

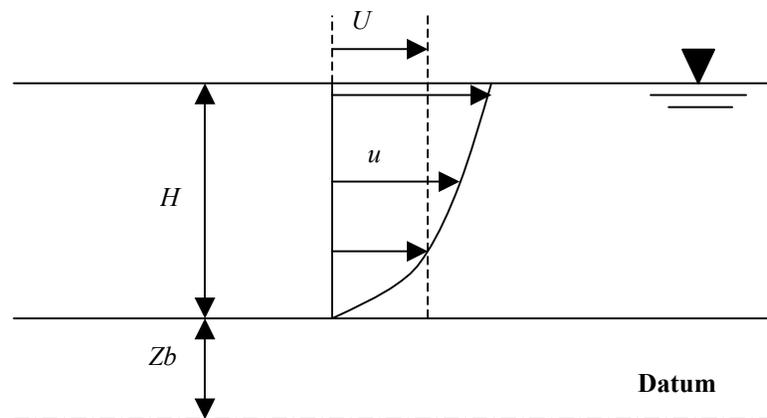


FIGURA 2.4.- Velocidad media en la vertical en las direcciones X y Y

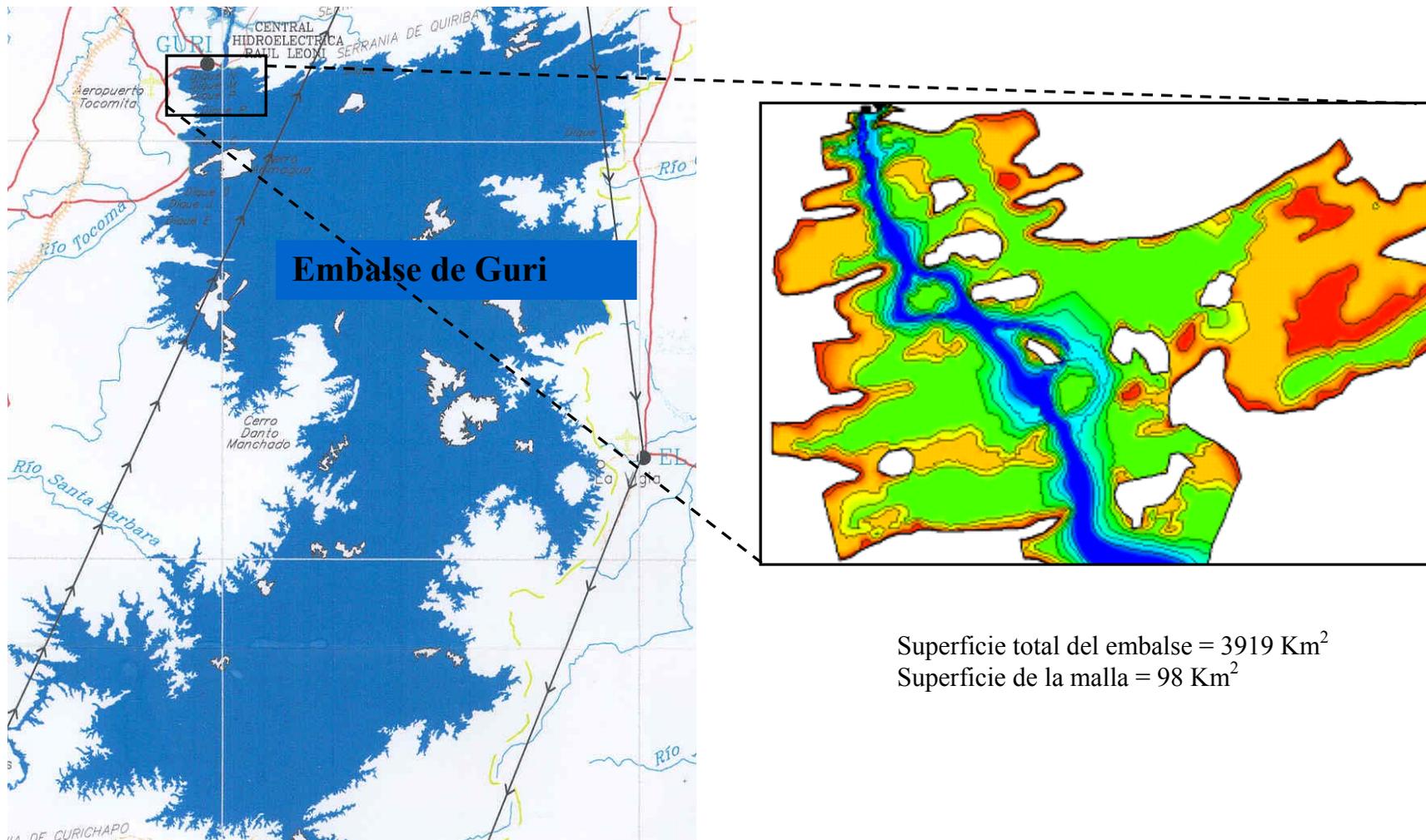


FIGURA 2.5.- Zona de simulación numérica para la malla de elementos finitos

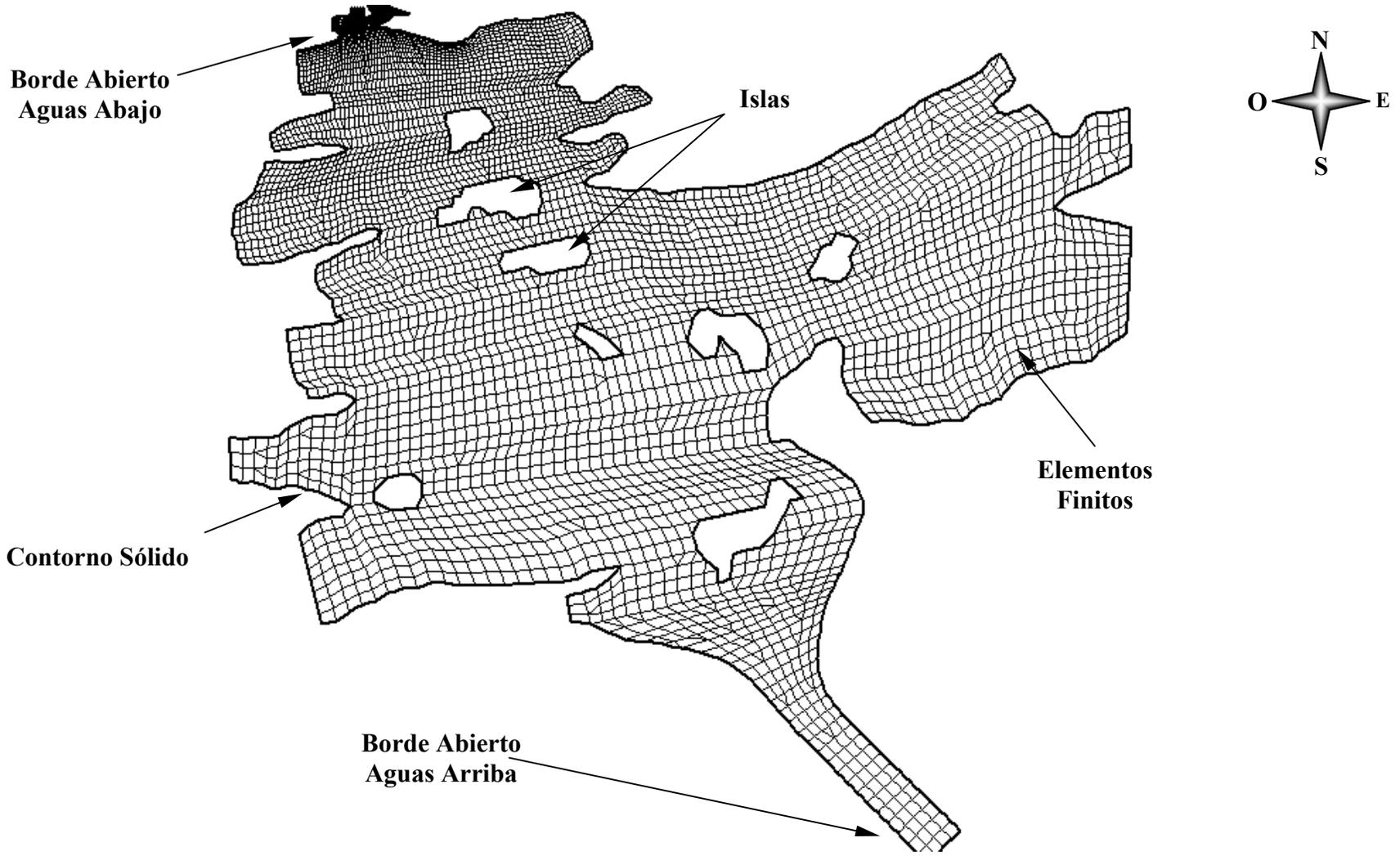
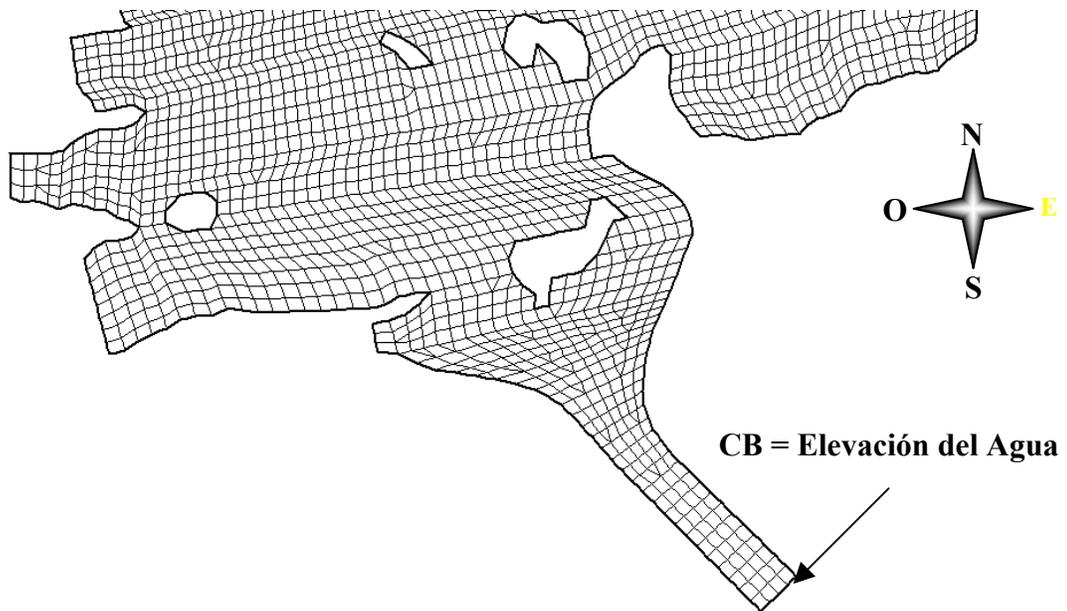
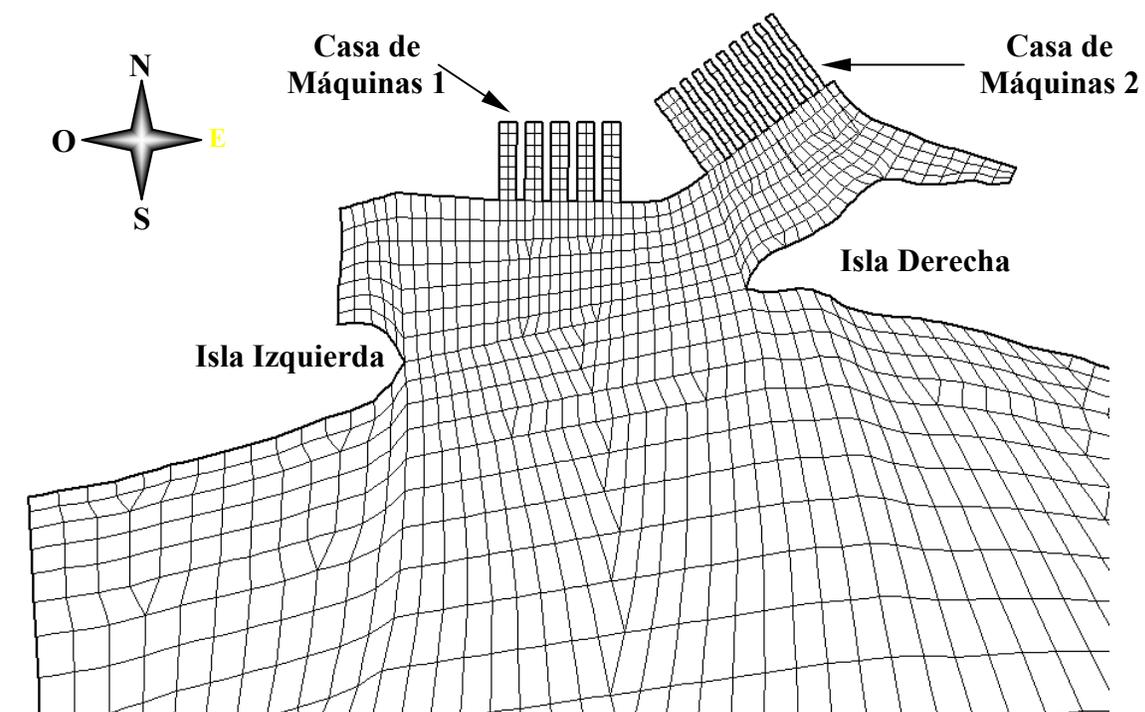


FIGURA 2.6.- Arreglo de elementos finitos



a) Borde abierto aguas arriba



b) Borde abierto aguas arriba

FIGURA 2.7.- Bordes abiertos aguas arriba y aguas abajo

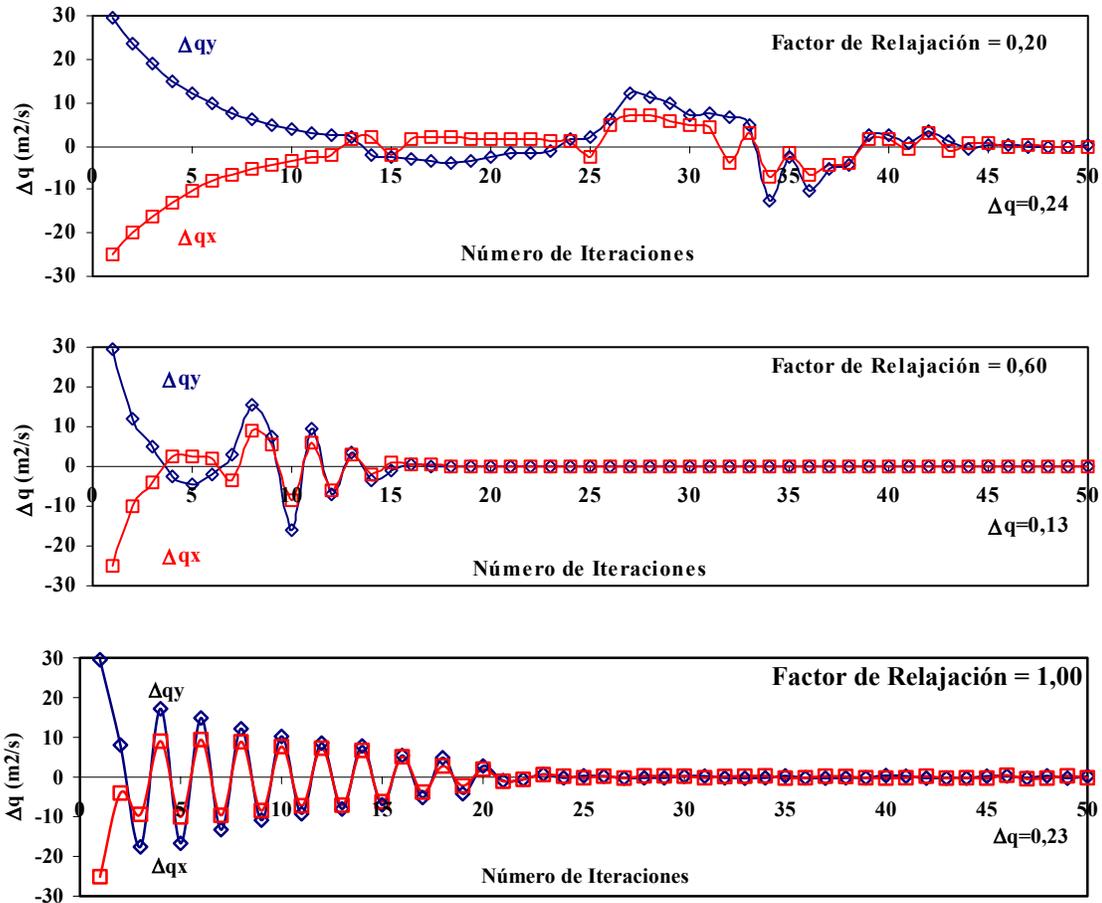


FIGURA 2.8.- Variación de convergencia numérica de la malla M2

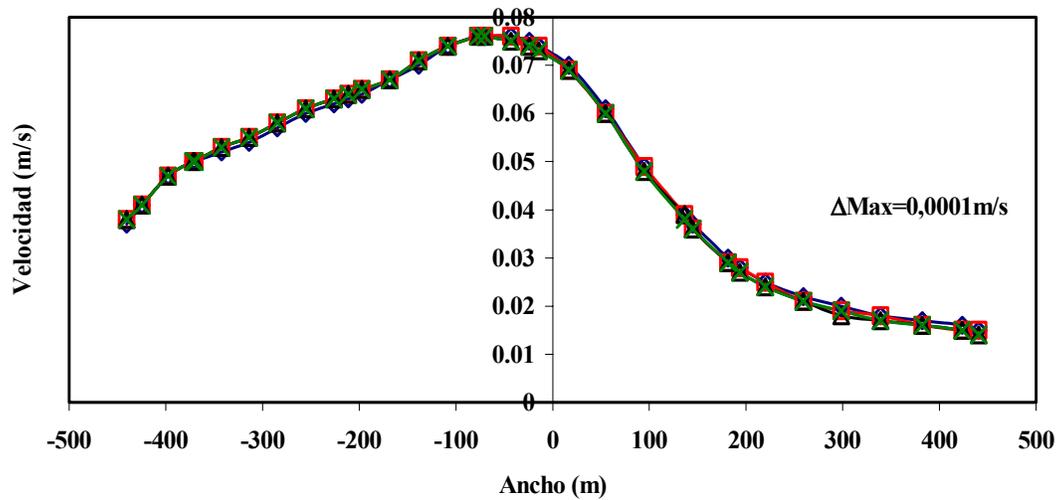


FIGURA 2.9.- Variación de las Velocidades

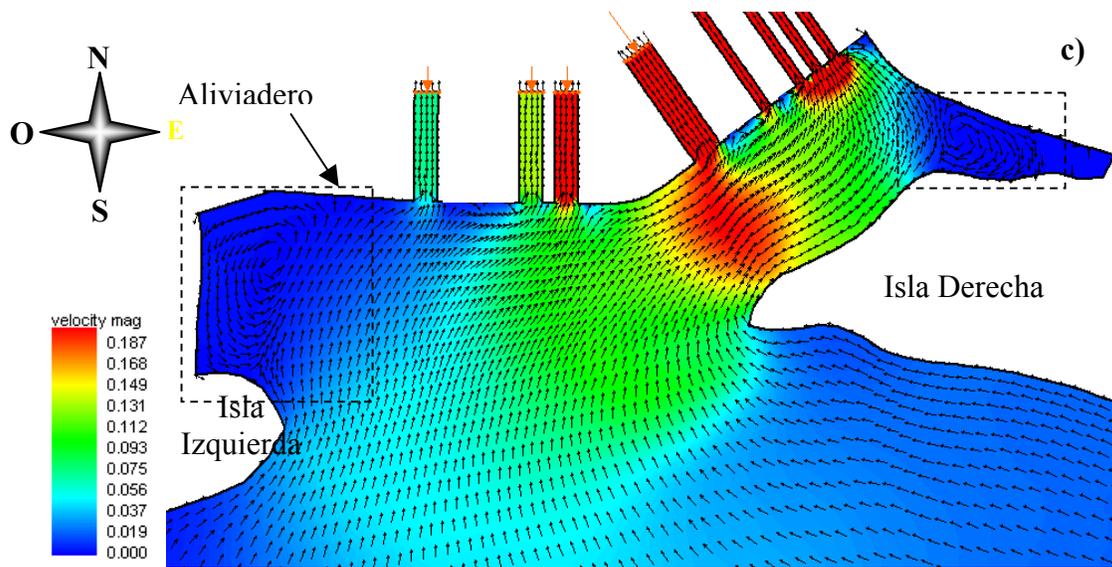


FIGURA 2.10.- Comparación modelo-prototipo

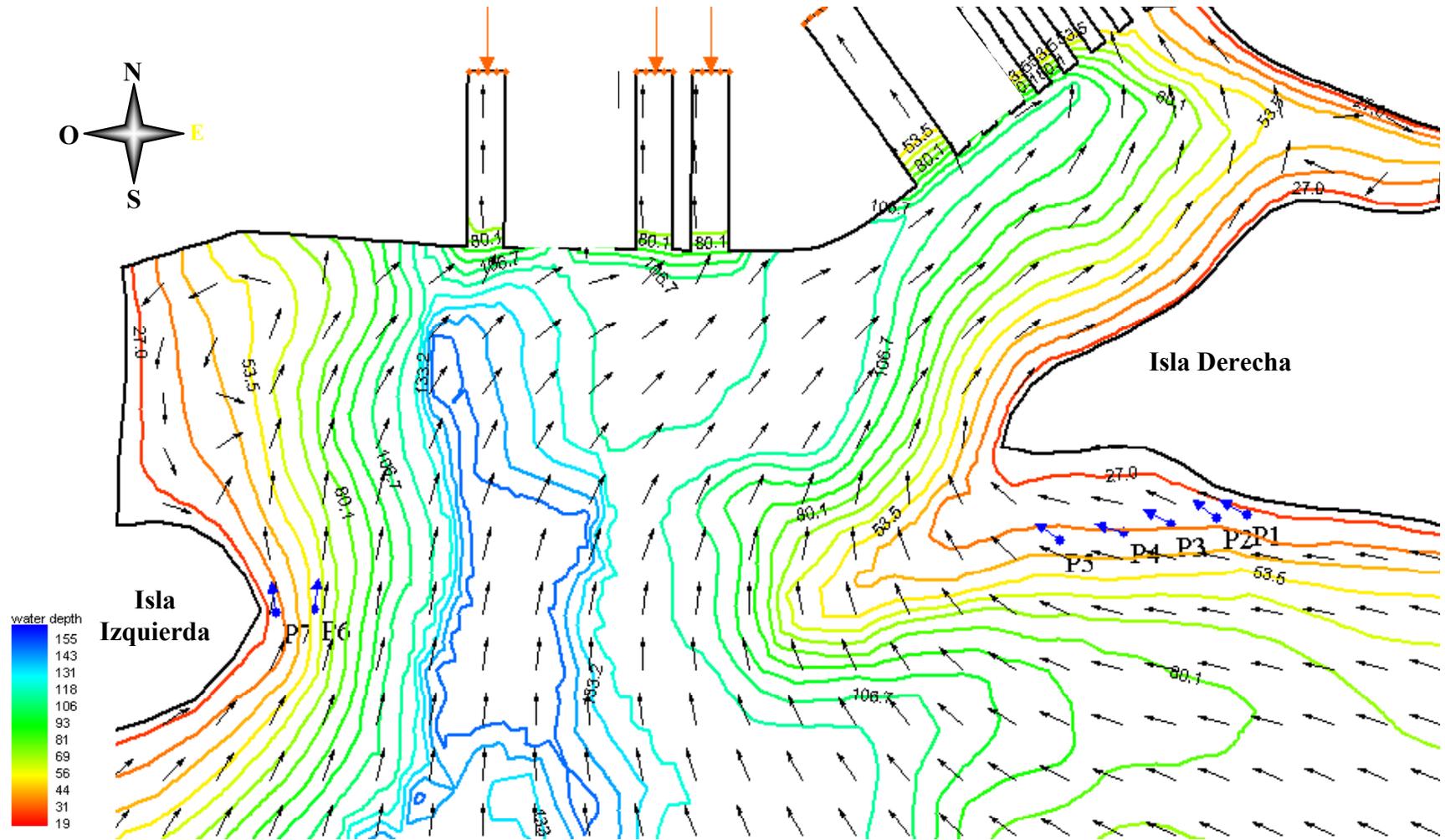


FIGURA 2.11.- Puntos de medición en el prototipo para la calibración

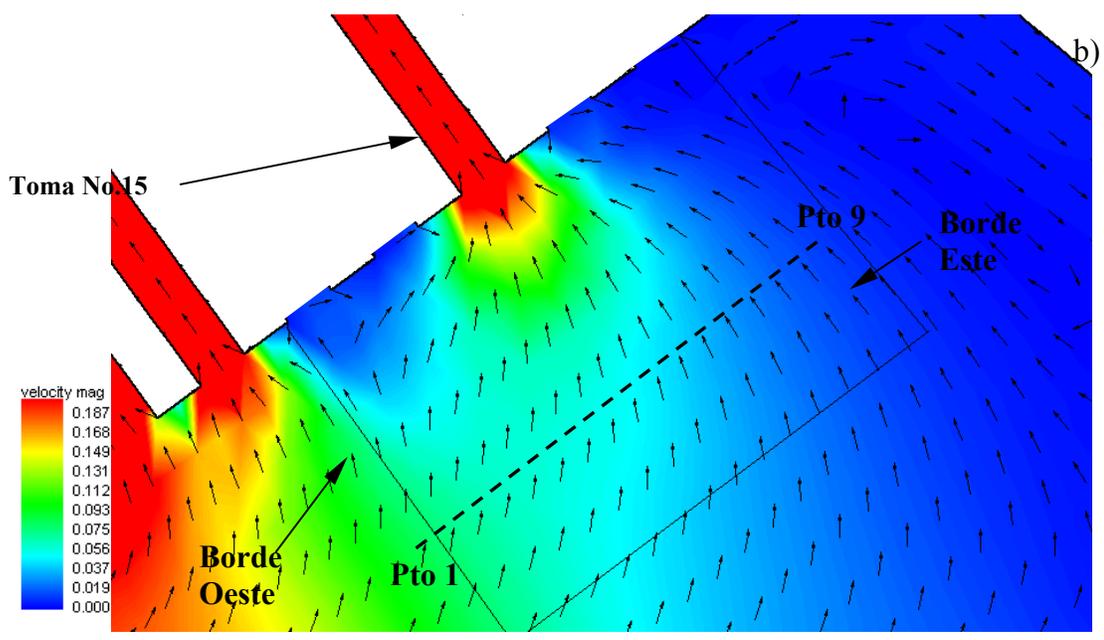
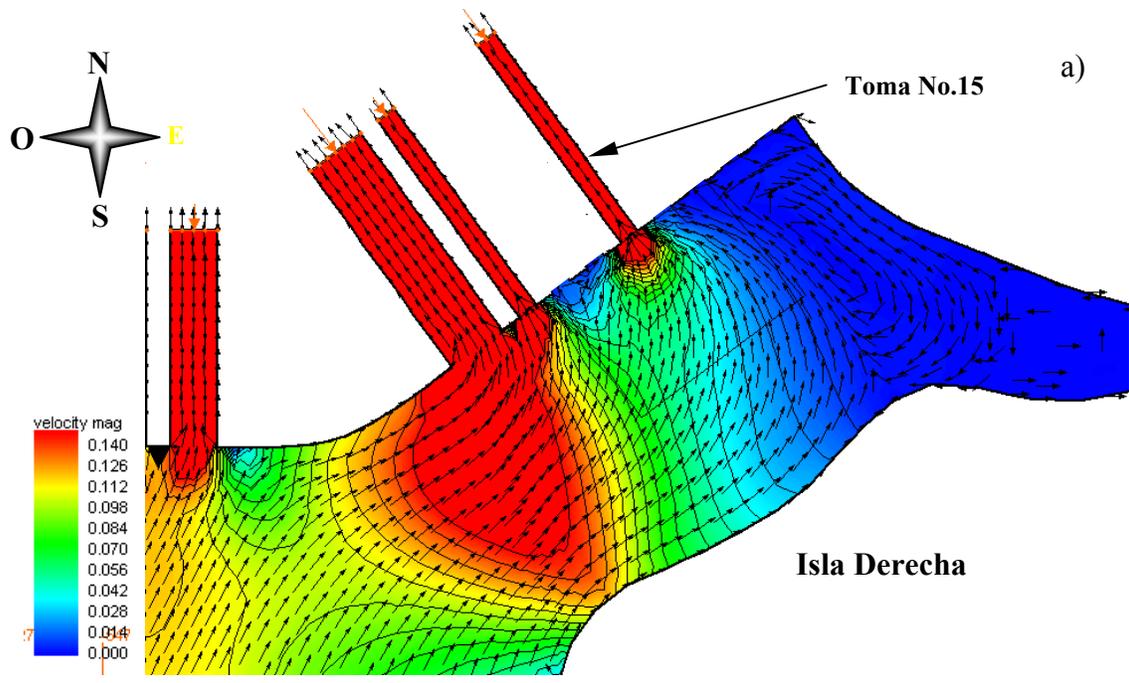


FIGURA 2.12.- Caso 1

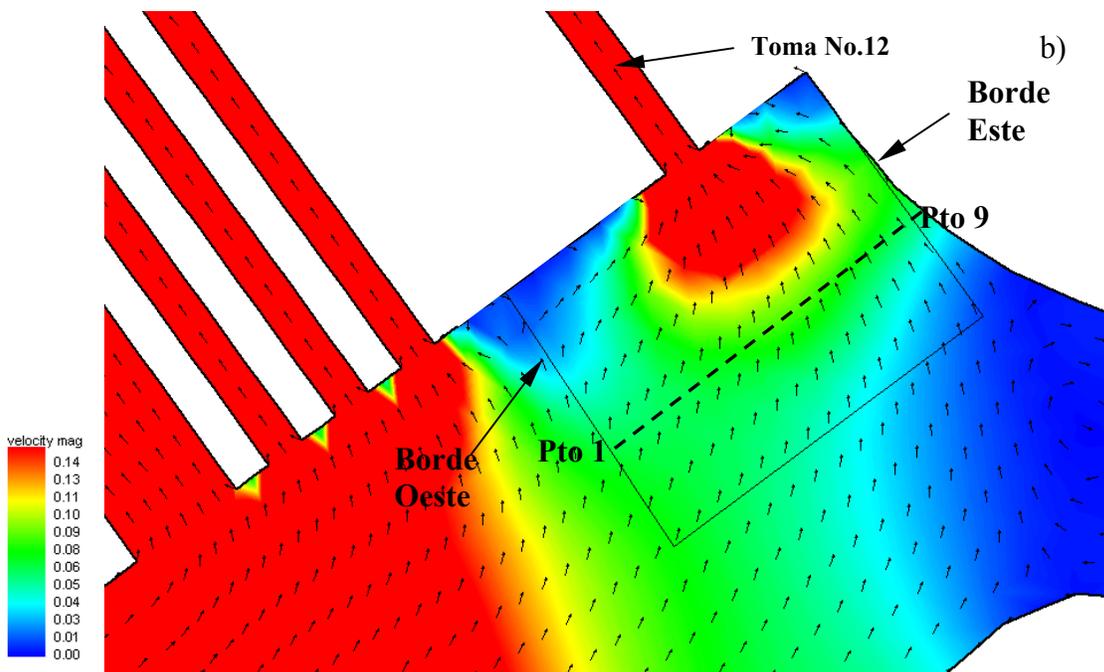
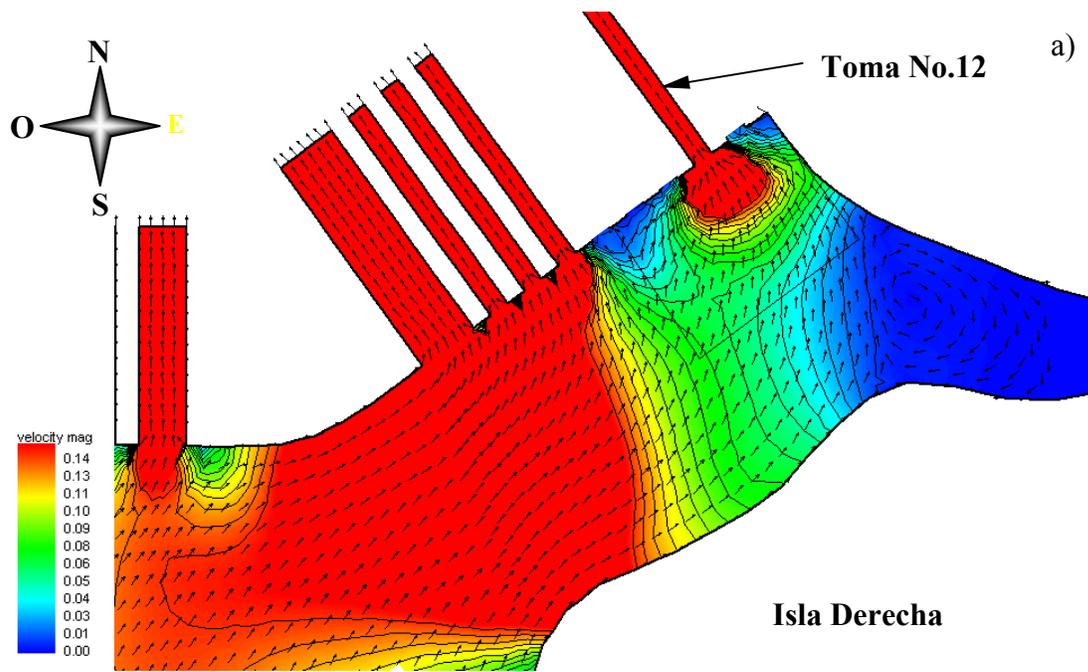


FIGURA 2.13.-Caso 2

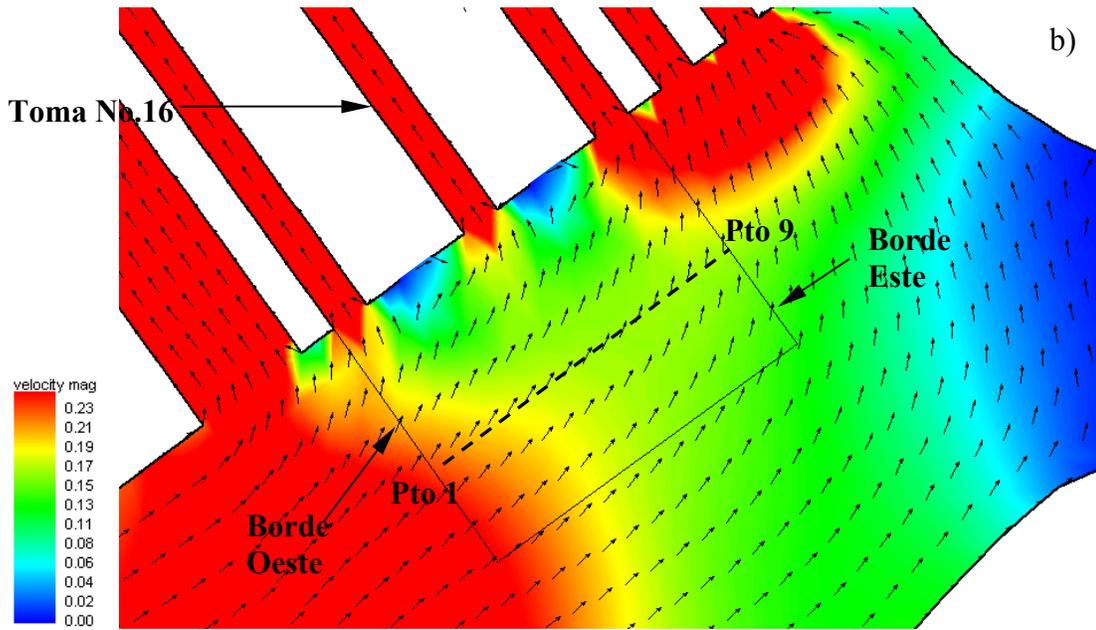
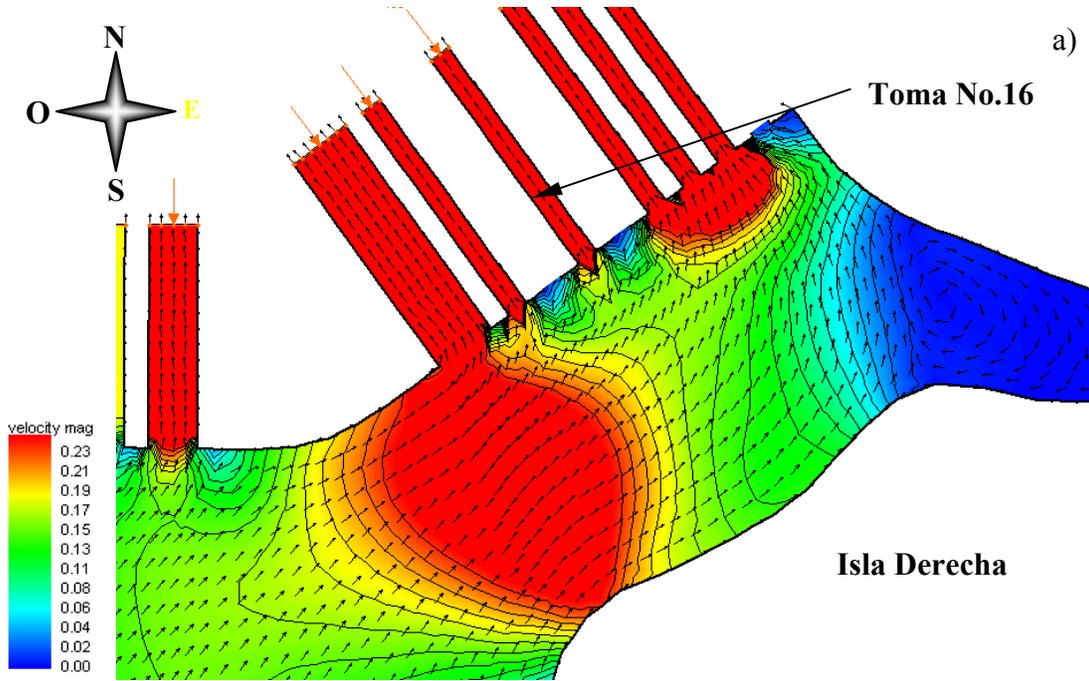


FIGURA 2.14.- Caso 3

CAPÍTULO 3

MODELAJE HIDRÁULICO DE VÓRTICES

La formación de vórtices en tomas sumergidas generalmente se origina por la ubicación excéntrica de la toma, relativa al flujo simétrico de aproximación o debido a las condiciones de aproximación asimétrica del flujo, que pueden ser originadas por: irregularidades de contorno, efectos desfavorables de construcción tales como pilas, paredes sumergidas, acción del viento y distribución no uniforme de velocidades originada por la separación de la capa límite. Sin embargo, Durgin y Hecker (1978) definen tres causas primordiales en la formación de vórtices:

1. Aproximación asimétrica del flujo a la toma, originado por la orientación geométrica de la entrada o del canal de aproximación, o debido a patrones de flujo generados por obstrucciones tales como pilas.
2. Existencia de planos de corte, originados por altos gradientes de velocidades, incluyendo la separación de la capa límite la cual es inherentemente rotacional.
3. Flujos rotacionales generados por objetos u obstrucciones en la vía del flujo de aproximación.

3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS VÓRTICES

Para establecer comparaciones desde el punto de vista práctico entre diversos estudios que se puedan realizar sobre la materia y obtener límites de aceptación de vórtices, de acuerdo a lo perjudicial que éstos puedan resultar, es necesario fijar ciertos patrones de diferenciación. Existen cuatro características fundamentales de los vórtices, que se utilizarán para establecer las clasificaciones:

Localización del vórtice relativo a la toma. Existen vórtices de superficie y sumergidos. Los vórtices de superficie comienzan en la superficie del agua y son

responsables de la posible entrada de aire a la toma. Los vórtices sumergidos comienzan a una cierta profundidad, en las paredes del canal de aproximación, en la toma, ranuras aristas vivas o en las tomas adyacentes, y son responsables de la intrusión de movimiento circulatorio dentro de la masa de agua. En algunos casos son más perjudiciales que los vórtices de superficie debido a que la presión del núcleo puede llegar a tener valores inferiores a la presión atmosférica y los gases disueltos pueden salir del seno del líquido causando daños por cavitación.

Dependencia del fenómeno con el tiempo. Pueden ser estables o fijos e inestables o intermitentes. Los vórtices estables se caracterizan por la existencia de una circulación permanente en el campo de aproximación al flujo, los vórtices intermitentes son el resultado de una fuente inestable de circulación en el flujo de aproximación.

Forma establecida del vórtice. Según su forma pueden ser clasificados en simples depresiones superficiales o vórtices con núcleo de aire.

Fuerza del vórtice. Se clasifican esencialmente por técnicas de observación visual o por medición de algunos parámetros que dependen directamente o indirectamente del fenómeno. Esto último, es difícil de ejecutar, puesto que generalmente la inestabilidad del fenómeno impide la medición exacta de las variables involucradas. Por este motivo, el “Alden Research Laboratory” creó un sistema de clasificación visual, basándose en la idea de que se necesitan vórtices más fuertes para succionar materiales boyantes de densidades menores. La Figura 3.1 muestra el sistema de clasificación visual más utilizado por la comunidad científica.

3.2 EFECTOS PERJUDICIALES

Las velocidades a lo largo de una toma o turbina, varían en todo el recorrido. Este cambio está asociado a una variación de las presiones en el contorno de la estructura, que si es propensa a la formación de vórtices, es casi seguro la intrusión de burbujas de aire en el flujo. La presencia de estas burbujas en el seno del líquido, le añade un carácter compresible, que unido a los cambios bruscos de presión, crean efectos negativos en la

estructura, tales como vibraciones y cargas dinámicas pulsantes. Estas vibraciones originan un deterioro progresivo de las turbinas, debido al desbalance de carga y la inestabilidad operativa de la máquina.

Una consecuencia inmediata del descenso de las presiones es la aparición del fenómeno de cavitación. Cuando la presión del líquido alcanza la presión de vapor en algún punto, el fluido cambia al estado gaseoso, provocando la formación de burbujas de vapor, perdiéndose la continuidad del estado de la materia y, ocasionando el fenómeno de cavitación cuando se incrementa la presión en el fluido. Este incremento induce a la implosión de burbujas de vapor, es decir, reducen su volumen cien mil veces en una fracción de segundo, provocando la destrucción de los contornos.

Las presiones negativas generadas por la cavitación, en la formación descrita anteriormente, pueden alcanzar valores instantáneos de 1470 bar (Mataix, 1975), en el caso de una burbuja aislada, en agua limpia y en contacto con el contorno. En casos reales las presiones producidas serán menores debido a las impurezas que contiene el agua y a que siempre hay una separación entre la burbuja y la superficie.

La cavitación afecta en forma progresiva a la máquina, ya que inicialmente existe una fatiga de los materiales, seguida de la destrucción de estos, creando nuevas irregularidades, que incrementan la ocurrencia del fenómeno, por la existencia de nuevos puntos creadores de bajas presiones.

Cuando existen vórtices de superficie mayores que el Tipo 3 (Figura 3.1), hay probabilidad que objetos flotantes, tales como basura, troncos de árboles entre otros, sean arrastrados desde la superficie hacia la toma, ocasionando posibles daños tanto físicos como operacionales. El arrastre de estos objetos lo produce el fenómeno de succión originado por la diferencia de presiones existentes entre el núcleo del vórtice y la superficie libre del agua.

3.3 MEDICIÓN DE VÓRTICES

Cuando se realiza un estudio referente a formación de vórtices y las consecuencias que ellos originan, es necesario emplear técnicas de medición y cuantificación de los vórtices, bien sean objetivas o subjetivas, con la finalidad de cuantificarlos y establecer un límite entre lo que resulta aceptable o perjudicial.

A continuación se presentan una breve discusión de las diversas técnicas para medir las características y efectos de los vórtices.

3.3.1 Circulación

El valor de la circulación se obtiene determinando la velocidad tangencial en un punto situado a una distancia (r) del centro del vórtice. La circulación se puede determinar o bien midiendo directamente la velocidad de las impurezas suspendidas en el fluido o por la medición de la sombra proyectada por el núcleo del vórtice (Método del rayo refractado de Anwar y Amphlett, 1980). También “Alden Reserch Laboratory”, diseñó un aparato que consiste de cuatro flotadores parcialmente sumergidos y conectados rígidamente unos con otros, el cual se centra fácilmente sobre el vórtice, y la velocidad angular puede ser determinada.

Sin embargo, no es fácil obtener el valor de la circulación correcto, o bien porque pequeñas perturbaciones pueden afectar la formación de los vórtices o debido a las características inestables y transitorias de la formación del vórtice.

3.3.2 Movimiento de Rotación de Fluido Dentro de la Toma

Si existe la presencia de vórtices Tipo 4, 5 o 6 (Figura 3.1) aguas arriba de una toma, el movimiento de rotación asociado al vórtice se transmite en forma de tirabuzón hacia el interior de la toma, por lo tanto una manera de cuantificar la intensidad del vórtice es midiendo la componente tangencial y axial de la velocidad instantáneamente dentro de la toma en varios puntos, para obtener el ángulo de rotación (ϕ).

Kanuss (1987), realizó un resumen donde se muestra en detalle este método de medición de vórtices utilizando un medidor de velocidad axial (propela axial) colocado dentro la tubería de aspiración vertical de una bomba en el laboratorio. Allí, se relaciona la velocidad de rotación tangencial del fluido y el ángulo de rotación con la velocidad de giro del instrumento. Sin embargo, esta técnica suele incurrir en errores de medición apreciables debido a que la rotación del fluido es originada por la rotación del núcleo del vórtice dentro de la toma y en ocasiones el núcleo tiende a pasar por un costado de los álabes de la propela axial y la rotación no es percibida por el instrumento de medición.

3.3.3 Coeficiente de Pérdida en la Toma

Una medida de la severidad de los vórtices, puede ser realizada a través de mediciones de las pérdidas de carga en la entrada de la toma. En general estas pérdidas son producidas por efectos que se superponen. El primero de ellos es el cambio del patrón de flujo en la entrada, y el segundo se refiere a las pérdidas por fricción que se generan, por causa del movimiento rotacional del vórtice.

Para cuantificar las pérdidas en la entrada se miden las presiones dentro de la toma en la región donde el flujo se encuentre completamente desarrollado. La pérdida de carga por efecto de la hidrodinámica de la toma es la diferencia entre la línea de energía total y la suma de las líneas de energía piezométrica y la carga de velocidad. Posteriormente cuando el vórtice aparezca se miden nuevamente la pérdida de carga en la toma y la diferencia entre la medición de carga sin vórtice y con vórtice representa la caída de energía por causa de la aparición del vórtice.

Esta técnica aún cuando es comúnmente utilizada en los laboratorios es insuficiente cuando existen vórtices Tipo 1, 2, 3 y 4 debido a que estos no arrastran aire y los instrumentos de medición utilizados para medir la pérdida de carga deben ser muy precisos.

3.3.4 Observación Visual

Utilizando cámaras filmadoras puede registrarse la intensidad de los vórtices en la superficie del líquido aguas arriba de la toma y luego procesar las imágenes y asociarlas con la clasificación visual elaborada por “Alden Research Laboratory” (Figura 3.1) y determinar lo perjudicial que puedan ser los vórtices observados para la máquina. Este método es comúnmente utilizado para clasificar el tipo de daños que pueden ocasionar cierto tipo de vórtice debido a que la inestabilidad del fenómeno impide la medición exacta de las variables involucradas y que se necesitan vórtices más fuertes para succionar materiales boyantes de densidades menores. Particularmente en el desarrollo de las investigaciones inherentes al proyecto fueron adoptados los dos últimos métodos para medir la magnitud de los vórtices.

3.4 REQUERIMIENTOS DE SIMILITUD

Para analizar los estudios en modelos físicos, es necesario correlacionar los resultados experimentales con los teóricos empleando parámetros adimensionales. El análisis dimensional consiste en deducir una relación funcional formada por un grupo de números adimensionales obtenidos mediante la combinación de las variables supuestas involucradas en el problema en estudio (Solana, 1980). La expresión funcional (3.1) muestra las variables involucradas en el fenómeno de formación de vórtices, considerando el esquema mostrado en la Figura 3.2.

$$h = f(\rho, \mu, \sigma, \Gamma, g, D, Q, \alpha) \quad (3.1)$$

Donde h es la profundidad del agua hasta la toma, ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad dinámica del fluido, σ es la tensión superficial del fluido, Γ es la circulación, g es la aceleración de gravedad, D es el diámetro de la tubería y Q el caudal.

Para encontrar la relación funcional adimensional (3.2) puede utilizarse los Métodos de Vaschy-Buckingham, Paso a Paso ó Rayleigh como lo plantea Solana (1980).

$$\frac{h}{D} = f\left(\frac{D\Gamma}{Q}, \frac{Q}{D\frac{\mu}{\rho}}, \frac{gD^5}{Q^2}, \frac{\sigma D^3}{\rho Q^2}, \alpha\right) \Rightarrow S = f\left(N_\Gamma, R_e, \frac{1}{F_r}, W_e, \alpha\right) \quad (3.2)$$

Donde S es la sumergencia de la toma, N_Γ es el número de circulación, R_e es el número de Reynolds, F_r es el número de Froude, W_e es el número de Weber y α es el ángulo de aproximación de las líneas de corriente.

Del análisis anterior podemos inferir que el fenómeno físico en estudio puede ser descrito por seis números adimensionales, sin embargo, para definir la importancia de cada uno de ellos es preciso desarrollar un análisis de similitud sobre las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento del fluido.

Cuando se han postulado ecuaciones diferenciales que gobiernan un fenómeno en particular y dicho fenómeno está bien definido por dichas ecuaciones, éstas expresadas en términos adimensionales suministran la más formal condición de similitud entre el modelo y el prototipo. Debido a que la formación de vórtices es un fenómeno completamente tridimensional, las ecuaciones diferenciales parciales del movimiento únicamente pueden ser ligeramente simplificadas. La Figura 3.2, muestra un esquema de las variables

involucradas durante el fenómeno de formación de vórtices tomando en consideración las ecuaciones diferenciales parciales que describen el movimiento del flujo tridimensional.

La ecuación de Navier-Stokes en tres dimensiones para régimen permanente y flujo incompresible escrita en coordenadas cilíndricas asumiendo simetría axial ($\partial/\partial\theta = 0$) se muestra en las expresiones (3.3 a 3.5):

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{V_r}{r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} = \nu \left(\frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

Donde, r , θ , z son las coordenadas radial, angular y axial respectivamente, V_r , V_θ , V_z son las velocidades radial, angular y axial respectivamente. P es la presión, ρ es la densidad del fluido, ν es la viscosidad cinemática del fluido, y g es la aceleración de la gravedad.

Las velocidades, radial y axial pueden ser expresadas en términos de las funciones de corriente adimensional (3.6) y de las cantidades adimensionales (3.7) con el propósito de encontrar las relaciones numéricas adimensionales que describen completamente el fenómeno en estudio.

$$V_r = \frac{Q}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad ; \quad V_z = -\frac{Q}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (3.6)$$

$$\eta = \frac{r}{D} \quad ; \quad \xi = \frac{z}{D} \quad ; \quad \Gamma = 2\pi \frac{V_\theta r}{\Gamma_\infty} \quad ; \quad \hat{P} = \frac{P}{P_0} \quad (3.7)$$

Donde Q es el caudal, Γ_∞ es la circulación, D es el diámetro, P_0 es alguna presión de referencia, η , ξ , Γ , \hat{P} son los números que adimensionalizan: el radio, la coordenada vertical, la circulación y la presión, ψ es la función de corriente.

Sustituyendo las expresiones adimensionales en las ecuaciones diferenciales parciales (3.3, 3.4 y 3.5) entonces se tiene que:

$$\eta \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta \partial \xi} - \left(\frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right)^2 - \eta \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - \frac{D^2 \Gamma^2 \Gamma_\infty^2}{4\pi^2 Q^2} = -\frac{\eta^3 D^4 P_0}{\rho Q^2} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \eta} + \dots$$

$$\dots + \frac{\nu D}{Q} \left(\eta^2 \frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta^2 \partial \psi} - \eta \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta \partial \xi} + \eta^2 \frac{\partial^3 \psi}{\partial \xi^3} \right) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial \xi} \frac{\partial \Gamma}{\partial \eta} - \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial \Gamma}{\partial \xi} = \frac{\nu D}{Q} \left(\eta \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \eta^2} - \frac{\partial \Gamma}{\partial \eta} + \eta \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial \xi^2} \right) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\eta^2} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta^3} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} + \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi \partial \eta} &= \frac{gD^5}{Q^2} - \frac{D^4 P_0}{\rho Q^2} \frac{\partial \hat{P}}{\partial \xi} + \dots \\ \dots + \frac{\nu D}{Q} \left(-\frac{1}{\eta} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta^3} + \frac{1}{\eta^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} - \frac{1}{\eta^3} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - \frac{1}{\eta} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \eta \partial \xi^2} \right) &\quad (3.10) \end{aligned}$$

De las ecuaciones diferenciales (3.8), (3.9) y (3.10) se deducen los cuatro números adimensionales siguientes:

$$N_\Gamma = \frac{D\Gamma_\infty}{Q}, \text{ Número de Circulación} \quad (3.11) \quad R_e = \frac{Q}{\nu D}, \text{ Número de Reynolds} \quad (3.12)$$

$$\frac{1}{F_r^2} = \frac{gD^5}{Q^2}, \text{ Número de Froude} \quad (3.13) \quad \frac{D^4 P_0}{Q^2 \rho}, \text{ Número Adimensional} \quad (3.14)$$

El número de Weber puede ser formado manipulando el número adimensional (3.14), haciendo $P_0 = \sigma / D$. Estos números adimensionales representan los parámetros de mayor importancia que describen el comportamiento de la formación de vórtices. Este análisis de similitud practicado sobre las ecuaciones de Navier-Stokes deducen los números adimensionales que predominan o que influyen principalmente en la dinámica del vórtice; debido a que en el análisis dimensional se deben suponer las variables que intervienen en el fenómeno físico y con las ecuaciones diferenciales no sucede lo mismo, por que las variables ya están incluidas naturalmente.

3.5 CRITERIOS DE MODELAJE DE VÓRTICES

El uso de Modelos Físicos a escala reducida, llamados también Modelos Hidráulicos, implica que éstos deben ser semejantes al prototipo, por lo cual debe satisfacerse las leyes de similitud Geométrica, Cinemática y Dinámica, que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas (Ettema, 2000).

Al igualar el número de circulación (N_T) del modelo y el prototipo se alcanzaría la similitud total del fenómeno de formación de vórtices puesto que la circulación es el parámetro característico por excelencia que identifica al vórtice, sin embargo desde el punto de vista práctico es imposible hacerlo.

El fenómeno en referencia involucra la aceleración gravitatoria (Knauss, 1987), y por esta razón, el parámetro más importante debe ser el número de Froude $=V/(gD)^{0.5}$, sin embargo, la similitud dinámica entre modelo y prototipo únicamente puede existir si los números de Reynolds, Weber y Froude son simultáneamente iguales (Vergara, 1999 y Semenov, 2003), pero esto, desde el punto de vista práctico es imposible tenerlo en el modelaje físico; por esta razón, los números de Reynolds y Weber, que se consideran relativamente menos relevantes que el número de Froude para el fenómeno aquí tratado, se aceptan distorsionados entre modelo y prototipo mediante la relajación de las relaciones dimensionales, debido a que el problema en estudio no varía apreciablemente con el número de Reynolds y Weber, a partir de ciertos valores, lo que hace depender el fenómeno exclusivamente de la gravedad. Así, al relajar los números de Reynolds y Weber se tienen las desigualdades (3.15 y 3.16):

$$\frac{R_m}{R_p} > \frac{R_{min}}{R_m} \quad \Rightarrow \quad L_r^{3/2} > \frac{R_{min}}{R_m} \quad (3.15)$$

$$\frac{W_m}{W_p} > \frac{W_{min}}{W_m} \quad \Rightarrow \quad L_r^2 > \frac{W_{min}}{W_m} \quad (3.16)$$

Donde R_m es el número de Reynolds del modelo, R_p es el número de Reynolds del prototipo, R_{min} es el número de Reynolds de referencia a partir del cual el fenómeno se hace independiente de la viscosidad, W_m es el número de Weber del modelo, W_p es el número de Weber del prototipo, W_{min} es el número de Weber de referencia a partir del cual el fenómeno se hace independiente de la tensión superficial y L_r es la escala del modelo hidráulico.

Sin embargo, la dificultad de conocer con exactitud los valores de R_{min} y W_{min} hacen imposible establecer la escala del modelo hidráulico utilizando las desigualdades (3.15 y 3.16). Esto ha sido tema de discusión durante décadas, debido a la aparición de efectos de escala entre la predicción de los modelos y lo que realmente ocurre en el prototipo; por ello, se han desarrollado muchos criterios alrededor de los mínimos valores

de los números de Reynolds y Weber que se deben presentar en los problemas de superficie libre para evitar los efectos de escala los cuales son fundamentales para la validación de un modelo físico (Yalim, 1971).

3.5.1 Efectos Viscosos

Daggett y Keulegan (1974) estudiaron la formación de vórtices en un tanque cilíndrico el cual tenía un drenaje en el medio del piso. Ellos utilizaron cinco diferentes tipos de fluidos y determinaron que los efectos de escala eran despreciables cuando el número de Reynolds $VD/\nu > 3,2 \cdot 10^4$. Estos ensayos pudieron demostrar la dependencia de la formación e intensidad de los vórtices con respecto a la viscosidad del fluido.

Anwar, Wéller y Amphlett (1978) realizaron experimentos para evaluar la intensidad de los vórtices y la entrada de aire en tomas horizontales. Los experimentos fueron realizados en un tanque rectangular con un arreglo circular de vanos semi-sumergidos alrededor de la toma. Anwar, concluyó que la circulación es menos dependiente de los efectos viscosos cuando el número de Reynolds radial $Q/h\nu > 3 \cdot 10^4$. Sin embargo, informes científicos desarrollados por Anwar (1981) utilizando los mismos datos experimentales que en el año 1978 aplicados a tomas horizontales, determinaron que no hay influencia de los efectos viscosos cuando el número de Reynolds radial $Q/h\nu > 10^5$, lo que representa un criterio más conservador que el planteado en el año 1978.

Padmanbhan y Hecker (1984) modelaron dos tomas horizontales a escala 1:1, 1:2 y 1:4. El modelo 1:4 corresponde a 152,4 mm de diámetro y los modelos fueron operados en rangos de números de Reynolds: $1,5 \cdot 10^4 < Q/h\nu < 2,9 \cdot 10^5$ y $7 \cdot 10^4 < VD/\nu < 9,3 \cdot 10^5$. El tipo de vórtices y su intensidad fue reportado durante los experimentos y los resultados mostraron que no hay efectos de escala. Padmanbhan, comenta que el Reynolds radial debe ser expresado en términos de la profundidad de aproximación h_a de las tomas en vez de expresarla en términos de la sumergencia de la toma, debido a que la formación del vórtice depende de las condiciones de aproximación. Si se implementa este cambio se tiene que no hay efectos viscosos cuando $Q/h_a\nu > 2,4 \cdot 10^4$.

Lindsey (1983) estudió la formación de vórtices en tomas verticales y horizontales. Usando las tomas verticales, varió la sumergencia desde $h/D=2,25$ hasta $h/D=3,3$, y

determinó el diámetro mínimo requerido, $D > 127$ mm, para evitar la influencia de la viscosidad en el experimento.

Tesis desarrolladas y analizadas por Galloway (1982) estudiaron el comportamiento de los vórtices en dos modelos a escala 1:1 y 1:2. Galloway (1982) concluyó que el mínimo número de Reynolds requerido para evitar los efectos viscosos en la simulación de vórtices tipo 5 y 6 era $VD/\nu > 3,5 \cdot 10^5$.

Lindblom (1987), realizó experimentos en un modelo hidráulico a escala 1:11,7 para predecir la aparición de vórtices en las tomas horizontales de la Central Hidroeléctrica de Rapidan en Minesota. La similitud geométrica de las tomas fue respetada y el montaje experimental se desarrolló en un tanque rectangular con la información topográfica existente. Lindblom (1987) comenta que el modelo a escala 1:11,7 tiene un número de Reynolds radial $Q/h\nu = 6,6 \cdot 10^4$ por debajo del criterio establecido por Anwar (1981), sin embargo Lindblom sustenta sus estudios en los resultados obtenidos por Padmanbhan y Hecker (1984), que garantizan la independencia de los efectos de escala cuando se trabaja con valores de $Q/h\nu > 1,5 \cdot 10^4$.

Simmler y Kresnik (1986) construyeron un modelo físico a escala 1:13,6 de la Central Hidroeléctrica de Khutai en Austria. El modelo físico fue desarrollado bajo el criterio de similitud de Froude, sin embargo, para adoptar la escala definitiva del modelo se realizaron estudios de efectos de escala enfocado en el número de Reynolds. Los análisis se centraron en conseguir el coeficiente de resistencia hidráulica del sistema en estudio, donde se estableció que el modelo debía tener una escala entre 1:5 y 1:20 para trabajar en la zona de turbulencia completamente desarrollada.

Mayrhofer, Ota y Tozzi (1992), realizaron investigaciones experimentales de la formación de vórtices en una toma horizontal con forma hidrodinámica. La escala del modelo fue 1:100 e incluye la geometría de la toma y la aproximación. El número de Reynolds obtenido fue $VD/\nu = 4,0 \cdot 10^4$, cumpliendo con los criterios establecidos en la literatura para tomas horizontales.

Fattah (2003) realizó estudios en un modelo físico a escala 1:10, representando una estación de bombeo de 24 tomas verticales ubicada en el Sur de Egipto. El modelo fue operado bajo el número de Reynolds $VD/\nu = 1,03 \cdot 10^5$ cumpliendo con el criterio de Daggett y Keulegan (1974). El modelo fue calibrado y reprodujo la aparición de vórtices en el

prototipo. Fattah (2003) recomendó la utilización de vanos sumergidos para inhibir la formación de vórtices en la estación de bombeo.

En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de los criterios para evitar los efectos viscosos en el modelaje de formación de vórtices.

TABLA 3.1 -. Criterios y estudios para evitar los efectos viscosos.

Autores	Tipo de Toma	Tipo de Tanque	Criterio o Estudio
Dagett y Keulegan	Vertical	Circular	$VD/\nu > 3,2 \cdot 10^4$
Anwar, Wéller y Amphlett	Horizontal	Rectangular	$Q/h\nu > 3 \cdot 10^4$
Anwar	Horizontal	Rectangular	$Q/h\nu > 10^5$
Padmanbhan y Hecker	Horizontal	Rectangular	$7 \cdot 10^4 < VD/\nu < 9,3 \cdot 10^5$
Lindsey	Vert. / Horz.	Rectangular	$h/D > 2,25 ; D > 127 \text{ mm}$
Galloway	Vertical	Rectangular	$VD/\nu > 3,5 \cdot 10^5$
Lindblom	Horizontal	Topografía	$Q/h\nu > 6,6 \cdot 10^4$
Mayrhofer, Ota y Tozzi	Horizontal	Topografía	$VD/\nu > 4,0 \cdot 10^4$
Fattah	Horizontal	Topografía	$VD/\nu > 1,03 \cdot 10^5$

3.5.2 Efectos de Tensión Superficial

Anwar, Wéller y Amphlett (1978) condujo experimentos en tomas horizontales durante los cuales se varió el número de Weber de la sumergencia ($\rho V^2 h / \sigma$) cambiando la velocidad del flujo y la sumergencia de la toma. Para valores del número de Weber de la sumergencia $\rho V^2 h / \sigma > 4 \cdot 10^4$ los efectos de tensión superficial eran despreciables. El reporte científico escrito por Anwar (1981) demostró que la circulación se convierte menos dependiente de los efectos de tensión superficial cuando $\rho V^2 h / \sigma > 3,0 \cdot 10^4$.

Padmanabhan y Hecker (1984) variaron la velocidad y el tamaño del modelo en sus experimentos y pudieron cubrir el rango $600 < \rho V^2 D / \sigma < 3,2 \cdot 10^4$. Sus resultados indican que

no hay efectos de escala cuando se trabaja dentro de este rango, por lo tanto se puede inferir que para valores de $\rho V^2 D / \sigma > 600$ los efectos de tensión superficial son despreciables. Lo cual significa un número inferior al planteado por Anwar y Amphlett (1980).

Daggett y Keulegan (1974) corrieron sus experimentos utilizando diferentes tipos de fluidos cubriendo un rango de tensión superficial entre 0,024 N/m y 0,072 N/m. Los experimentos reportan que no hay efectos de tensión superficial durante las observaciones realizadas. Sin embargo, los gráficos y figuras no fueron incluidos en el artículo científico y las características del flujo no fueron identificadas durante la comparación.

Jain, Ranga Raju y Garde (1978) utilizaron diferentes tipos de fluido en sus experimentos, variando la tensión superficial desde 0,044 N/m hasta 0,072 N/m, correspondiente a un número de Weber ($\rho V^2 D / \sigma$) entre 120 y $3,4 \cdot 10^4$. Ellos argumentan que el cambio de tensión superficial del fluido no influye sobre la formación de vórtices. Sin embargo posteriores experimentos realizados en tomas verticales entre 11,4 mm y 74,6 mm sugieren la posibilidad de aparición de efectos de tensión superficial.

Simmler y Kresnik (1986) aún cuando desarrollan con detalle la influencia de los efectos viscosos, mencionan que los efectos de tensión superficial son despreciables debido a que el modelo tiene una escala (1:13,9) lo suficientemente grande como para descartar cualquier influencia del número de Weber.

Los experimentos de Lindblom (1987) trabajaron con un número de Weber $\rho V^2 D / \sigma = 1,9 \cdot 10^3$. Las conclusiones del trabajo establecen que el modelaje físico no debería tener efectos de tensión superficial puesto que el rango de trabajo de su experimento satisface los criterios anteriormente planteados.

Mayrhofer, Ota y Tozzi (1992), comentan que los efectos de tensión superficial deben ser analizados con mas detalle en trabajos posteriores y por este motivo las soluciones planteadas en sus estudios son muy conservadoras.

Fattah (2003) sustenta sus resultados en la hipótesis de Jain, Ranga Raju y Garde (1978) y da por descartado los efectos de tensión superficial en sus experimentos.

En la Tabla 3.2 se muestra un resumen de los criterios para evitar los efectos de tensión superficial en el modelaje de formación de vórtices.

TABLA 3.2 -.- Criterios y estudios para evitar los efectos de tensión superficial.

Autores	Tipo de Toma	Tipo de Tanque	Criterio o Estudio
Dagett y Keulegan	Vertical	Circular	$0,024 \text{ N/m} < \sigma < 0,072 \text{ N/m}$
Anwar, Wéller y Amphlett	Horizontal	Rectangular	$\rho V^2 h / \sigma > 3 \cdot 10^4$
Anwar	Horizontal	Rectangular	$\rho V^2 h / \sigma > 4 \cdot 10^4$
Padmanbhan y Hecker	Horizontal	Rectangular	$\rho V^2 D / \sigma > 600$
Jain, Ranga Raju y Garde	Vertical	Rectangular	$\rho V^2 D / \sigma > 120$
Lindblom	Horizontal	Topografía	$\rho V^2 D / \sigma > 1,9 \cdot 10^3$
Fattah	Horizontal	Topografía	$\rho V^2 D / \sigma > 120$

3.5.3 Criterio de Igualación de Velocidades

En la literatura existen diversos estudios relacionados con la posibilidad de igualar la energía cinética del fluido del modelo a la del prototipo. Denny y Young (1957) desarrollaron experimentos con tomas de agua en bombas y concluyeron que para simular las apropiadas condiciones de flujo, la velocidad en el modelo tiene que ser similar a la del prototipo. Ellos argumentan que cuando se utiliza la regla de igualación de velocidades los parámetros de turbulencia y vorticidad son más severos que en el prototipo. Por lo tanto, cualquier medida correctiva estudiada en el modelo debe ser efectiva en el prototipo.

Denny y Young (1957) argumentan que los modelos de escala mayor a 1:16 pueden arrojar resultados precisos si las velocidades del modelo se igualan a las del prototipo. Reddy y Pickford (1974) desarrollaron ecuaciones que relacionan la velocidad y la vorticidad en sifones y bordes de pared delgada, los cuales dependen del número de Reynolds. Estas ecuaciones sugieren que para que el modelo y el prototipo tengan la misma fuerza del vórtice entonces el modelo debe ser operado con la misma velocidad del prototipo.

Muchos investigadores apoyan la adopción de igualar la velocidad del prototipo en el modelo porque es un concepto que garantiza el diseño conservativo de las tomas de agua,

debido a que la tendencia de formación del vórtice es exagerada al distorsionar el criterio de similitud de Froude durante los experimentos.

Fernández y Méndez (1991) desarrollaron su proyecto de Tesis estudiando los vórtices en el aliviadero de la Central Hidroeléctrica de Caruachi en un modelo hidráulico a escala 1:80. En los experimentos utilizaron la similitud de Froude (Froude del modelo=Froude del prototipo) y observaron vórtices (Tipo 4 y 5) en las compuertas radiales del aliviadero. Actualmente, los vórtices observados en el prototipo son similares a las fotografías de los vórtices documentados por Fernández y Méndez (1991).

Adicionalmente, estudios realizados por Delgado (2003) en un modelo a escala 1:80 de la Central Hidroeléctrica de Caruachi, utilizando el criterio de similitud de Froude, pudo correlacionar los vórtices (Tipo 4, 5 y 6) formados en las entradas de los ductos de desvío del modelo con el prototipo.

3.6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO

Con la finalidad de estudiar con mayor detalle la interacción entre el flujo de agua, los vórtices, el arrastre de aire y la geometría específica de la toma se diseñó un modelo físicos a escala reducida. Los modelos físicos, generalmente a un tamaño menor que el prototipo, resuelven problemas que prácticamente en los modelos matemáticos resultarían inoperables, como pueden ser los debidos a problemas tridimensionales, a la influencia de la macroturbulencia, que en muchos casos hacen el problema irresoluble a pesar de los grandes adelantos en métodos numéricos y computadoras de alta velocidad y capacidad de procesamiento.

Debido a que la aceleración de gravedad y las fuerzas inerciales son predominantes en el flujo con superficie libre, el número de Froude en el prototipo y el modelo son iguales. El número de Froude al cuadrado representa la relación entre las fuerzas gravitatorias y las inerciales:

$$F_r^2 = \frac{\rho V^2 L^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{gL} \quad \Rightarrow \quad F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{4Q}{\pi \sqrt{gL^3}} \quad (3.17)$$

Los requerimientos de similitud desarrollados en la Sección 3.4 definieron las variables y relaciones matemáticas funcionales que describen el problema de formación de vórtices y arrastre de aire en una toma sumergida. La velocidad del fluido, la geometría, las

condiciones de aproximación, las propiedades del fluido y los objetivos específicos del estudio fueron incorporados, para establecer diseños preliminares del modelo hidráulico.

Análisis e investigaciones exhaustivas como las descritas en la Sección 3.5 determinaron que el modelo debía ser diseñado a una escala lo suficientemente grande como para evitar efectos de escala que perjudicaran los resultados de los experimentos. Esta investigación fue de vital importancia para el diseño final del modelo físico.

Todo modelo físico tiene limitaciones con respecto a las áreas a ser estudiadas, a diferencia de los modelos matemáticos que básicamente no las tienen. En el laboratorio de Hidráulica de CVG EDELCA se dispone de un tanque de concreto armado de 7,22 m de largo por 4,88 m de ancho por 3,20 m de altura el cual posee una compuerta de aducción en la parte posterior que dosifica el suministro de agua al área en estudio (Figura 3.3). La capacidad de caudal máximo de suministro al tanque es de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual representa una ventaja considerable para el desarrollo del modelo físico a escala grande.

Análisis geométricos fundados en los planos “como construidos” de las tomas de Casa de Máquinas 2 (Apéndice 1) y las limitaciones de espacio establecieron que la toma no podía ser más grande que la escala 1:20.

Diversos materiales de construcción se consideraron para elaborar el modelo. Maderas, concreto, plásticos, fórmica y plexiglás fueron algunos de los materiales considerados, sin embargo el plástico y la fórmica fueron descartados por las características de durabilidad y de exposición a la intemperie. La madera y el concreto aún cuando los tiempos de construcción eran relativamente cortos, fueron descartados, porque impedían observar el fenómeno dentro de la toma. Por lo tanto, se seleccionó el plexiglás como principal material de construcción el cual ofrece una rugosidad muy baja y es traslucido, permitiendo la investigación de los fenómenos hidráulicos inclusive dentro de la toma. Sin embargo, evaluaciones de las capacidades del taller, tiempos de ejecución, manejabilidad de los materiales y considerando los criterios mundiales en el modelaje de vórtices, establecieron la escala definitiva del modelo hidráulico en 1:30 (Figura 3.4 y 3.5), constituido por una toma geoméricamente idéntica al prototipo (Apéndice 1) y un área adecuada aguas arriba para representar la aproximación a la toma.

3.6.1 Tanque aguas Arriba

El modelo está constituido de un área de estudio aguas arriba, como se describió en los resultados del Capítulo 3, que garantiza la representación de las líneas de corriente hacia la toma, simuladas por el modelo matemático bidimensional de elementos finitos. El piso del tanque está lo suficientemente profundo como para no influir en los perfiles de velocidades tridimensionales en el dominio de la toma. Sin embargo, cerca de los bordes del modelo, representados por las paredes del tanque el estudio no será válido debido a la influencia de límites físicos, donde el esfuerzo cortante es diferente a cero, lo cual no ocurre en el prototipo. El tanque posee una compuerta de aducción aguas arriba que permite el paso del caudal hacia área del modelo, un filtro amortiguador para disipar la energía del chorro sumergido proveniente de la compuerta de aducción y una batería de álabes móviles semi-sumergidos para reproducir el ángulo de ataque de los Casos 1, 2 y 3 desarrollados en el Capítulo 3.

3.6.2 Reja Contra Basura

La reja contra basura es el único elemento de la toma el cual fue construido de láminas de acero. El prototipo posee una reja contra basura (Figura 3.6a) que evita el paso de objetos boyantes hacia la turbina, representar su geometría respetando la escala geométrica es poco práctico debido a lo tupido de los nervios de acero (Figura 3.7a), por lo tanto, se distorsionó la distribución de los espacios libres horizontales ($\Delta=2$) conservando los límites geométricos de la reja contra basura, como se muestra en la expresión (3.18):

$$\frac{A_{libre_m}}{A_{libre_p}} = X_r L_r = \Delta L_r^2 \quad (3.18)$$

Donde A_{libre_m} es el área libre de paso de agua de la reja contra basura en el modelo, A_{libre_p} es el área libre de paso de agua de la reja contra basura en el prototipo, X_r es la escala horizontal, $L_r=1/30$ la escala vertical y Δ es la distorsión.

Se estableció un criterio hidráulico de conservación de áreas; en el cual se mantiene la relación, entre el área libre de paso de agua contra el área obstruida por los elementos de acero, en el modelo y el prototipo. El prototipo (Figura 3.6a) posee una relación de $A_{libre}/A_{obs}=1,20$, sin embargo, debido a las características físicas de las láminas de acero

utilizadas para la construcción del modelo, la relación en el modelo (Figura 3.6b y 3.7b) fue $A_{\text{libre}}/A_{\text{obs}}=1,17$. En la calibración del modelo hidráulico (Sección 3.8) se muestra el desarrollo experimental para validar el criterio hidráulico de conservación de áreas.

3.6.3 Toma de Casa de Máquinas 2

La toma está elaborada completamente en plexiglás transparente. Está constituida (Figura 3.4) por 5 segmentos:

Segmento 1. Abocinamiento hidrodinámico de sección rectangular convergente de 508 mm de longitud (15,2 m en prototipo), el cual conecta el embalse con el conducto a presión, allí, se incluyen las tres ranuras o fosas de las compuertas de mantenimiento, servicio y emergencia (Desde aguas arriba hacia aguas abajo) las cuales se utilizan para regular el paso de caudales gruesos hacia el conducto a presión.

Segmento 2. Pila intermedia de 705 mm de longitud la cual divide la toma rectangular en dos secciones, izquierda y derecha. La pila tiene forma hidrodinámica y se extiende desde la cota 217,00 m.s.n.m. hasta el tope superior del modelo (Elevación 260,00 m.s.n.m)

Segmentos 3. Codo convergente con cambio de sección de rectangular a circular con un ángulo de desarrollo de 25° con respecto a la vertical, donde termina el extremo mas aguas abajo de la pila intermedia.

Segmento 4. Codo convergente de sección circular con desarrollo de 30° , el cual conecta los segmentos de transición (Segmentos 1 al 3) con la tubería forzada. Este segmento reduce el diámetro desde 379 mm a 350 mm.

Segmento 5. Una sección de tubería forzada de 999 mm de longitud constituida por 3 tramos de 350 mm de diámetro (10,5 m prototipo) con una pendiente de 0,75:1, que representa el borde más aguas abajo de la zona en estudio. Esta sección de tubería es unida a una tubería de plástico de 12" de diámetro mediante una reducción suave que conduce el agua hacia el medidor de caudal electromagnético, y a la válvula de regulación de caudal

para luego salir hacia la atmósfera (Figura 3.5). Esta tubería tiene 7,2 m de longitud desde el último codo, para garantizar que la regulación de la válvula no afecte el comportamiento de las líneas de fluido en la toma y que el medidor de caudal electromagnético estuviese en la zona de flujo completamente desarrollado ($X/D > 10$) de la tubería de 12" (Incropera, 1996).

Los elementos están constituidos por virolas pegadas a tope unas con otras y se encuentran unidos por bridas transparentes de plexiglás, calculadas para resistir una presión de 40 KPa_g.

3.7 INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN

La instrumentación representará un papel principal en la obtención de resultados precisos y confiables durante el proceso de calibración y desarrollo de los experimentos. Por tal motivo, es importante conocer las características generales de los equipos de medición, así como su funcionamiento y medición.

3.7.1 Regulación de Caudal y Nivel

Mediante una válvula de compuerta de 12" de diámetro ubicada a 12 m aguas abajo de la toma, se regula el caudal que transita por el sistema en estudio, Figura 3.5. Esta válvula no puede descargar caudales superiores a los 304,0 lts/s (1498,0 m³/s prototipo) por causa de la carga estática sobre su eje (Elevaciones de agua menores a la 240,00 m.s.n.m.). El nivel del agua se mantiene constante cuando el caudal que ingresa por la compuerta de aducción y sale por la válvula de regulación, son similares (régimen estacionario).

Para efectos de medición en el modelo hidráulico se considerará que se ha alcanzado el régimen estacionario cuando el descenso o el ascenso del nivel de agua cumpla con la expresión (3.18), correspondiente a un error de 0,00059 m³/s:

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_f - h_o}{t_f - t_o} \leq 1 \text{ mm} / \text{min} \quad (3.18)$$

Donde Δh es la variación del nivel de agua, h_f es el nivel de agua final en el tanque, h_o es el nivel de agua inicial en el tanque, Δt es el intervalo de tiempo, t_f es el tiempo final para h_f , t_o es el tiempo inicial para h_o .

La Figura 3.8, muestra el esquema de medición de caudal. El medidor de flujo ó también llamado Flujómetro es marca NUSONIC y genera un campo electromagnético dentro de la tubería de 12", el cual es atravesado por las líneas de flujo variando la intensidad de corriente de salida del equipo, entre 4 y 20 mA, la cual es conectada a un sistema de adquisición de datos digitales. La precisión está expresada por la curva de calibración del equipo (Apéndice 3) y la resolución es infinita.

El medidor de nivel utilizado es marca MILTRONIC (Figura 3.9). Para detectar la elevación del agua, el equipo emite una señal ultrasónica, la cual es transformada en intensidad de corriente (4 a 20 mA) directamente proporcional a la distancia relativa entre la superficie del agua y el sensor ultrasónico. La precisión del equipo es 0,25% de la escala completa y su resolución es 3 mm.

3.7.2 Velocidades

Las velocidades serán medidas por un medidor de velocidades tridimensional por efecto Doppler llamado, Micro-ADV 3D, marca SONTEK. Se utilizará en el tanque (Figura 3.10) para medir las componentes de las velocidades en tres dimensiones en todo el volumen de agua contenido en el tanque. La frecuencia de muestreo implementada es 10 MHz y la precisión del instrumento es 1% de la muestra de velocidad. El medidor 3D se conecta directamente al sistema de adquisición de datos mediante el puerto RS-232 para transmitir la señal digital. Se utilizó un computador 386 (Figura 3.10) para conectar la tarjeta de procesamiento del Micro-ADV 3D (ADV Lab PC card) debido a que la conexión necesita un puerto tipo ISA. Sin embargo, la base de datos almacenada es muy liviana y no representa un problema para la memoria del computador (SonTek 2003).

3.7.3 Presiones Piezométricas y Diferenciales

Se colocaron 110 piezómetros a todo lo largo de la toma como se aprecia en la Figura 3.11, tanto en la parte superior como en la parte inferior con el propósito de estudiar la hidrodinámica dentro de la toma. Los piezómetros son de 8 mm de diámetro para evitar efectos capilares y son conectados al cuerpo de la tubería de plexiglás y leídos en dos paneles de medición verticales con precisión de 1 mm. Pruebas estáticas con máxima carga garantizaron y confirmaron la completa estanqueidad de las conexiones. Previamente a las

mediciones, los piezómetros son purgados para inhibir efectos compresibles (burbujas) en los tubos piezométricos.

Mediante un medidor de presión diferencial marca SENSOTEK de placa flexible (strain gauge) con alimentación de 10 Volt DC, se calcula la presión diferencial entre el embalse y las secciones 1 y 2 mostradas en la Figura 3.12. El rango de medición seleccionado es de 0 a 2 Psig (0 a 1,37 m.c.a.) correspondiente a un voltaje de salida de 0 a 15 mVolt. La precisión del instrumento es 0,25% a escala completa y la resolución es infinita.

El esquema de conexión se muestra en la Figura 3.12. Los piezómetros de la secciones 1 y 2 y el embalse son conectados a la flauta de válvulas selectoras que a su vez están unidas al medidor de presión diferencial SENSOTEK. La señal del medidor de presión diferencial es conducida al acondicionador de señal y luego al sistema de adquisición de datos, donde es posible apreciar la evolución y el comportamiento de la medición.

3.8 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

La única garantía de que los resultados de los ensayos sean útiles para describir cualitativa y cuantitativamente el fenómeno hidráulico en estudio es mediante la calibración y validación del modelo hidráulico con patrones de referencia conocidos. Estos patrones referenciales están representados por el comportamiento del prototipo bajo las condiciones de operación habituales o particulares del estudio.

Las turbinas Francis de Casa de Máquinas 2, operan normalmente entre un rango de caudales de 300 a 600 m³/s (Apéndice 4) dependiendo de la altura neta disponible y la demanda energética del sistema interconectado Venezolano.

La Tabla 3.3 muestra los valores de los números de Reynolds y Weber para caudales entre 0,0608 y 0,1217 m³/s en el modelo físico a escala 1:30, y 300 y 600 m³/s en el prototipo, considerando la elevación 240,00 m.s.n.m. como referencia para calcular los números adimensionales:

TABLA 3.3.- Reynolds y Weber

Número Adimensional	$Q_{\text{modelo 1:30}} \text{ (m}^3/\text{s)}$		$Q_{\text{prototipo}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	
	0,1272	0,0608	600	300
VD/ν (Reynolds)	$1,2 \cdot 10^5$	$6,0 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^7$
$Q/h\nu$ (Reynolds)	$2,0 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^7$
$\rho V^2 D / \sigma$ (Weber)	$7,6 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^6$
$\rho V^2 h / \sigma$ (Weber)	$1,3 \cdot 10^4$	$0,6 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^7$	$0,3 \cdot 10^7$

Los valores de los números de Reynolds y Weber del modelo físico son tan grandes que no influyen para nada en el proceso de formación de vórtices. Los criterios establecidos por Daggett y Keulegan (1974), Anwar, Wéller y Amphellett (1980), Anwar (1978), Padmabhan y Hecker (1984), Lindsey (1983), Limblom (1987) y Mayrhofer, Ota y Tozzi (1992) son satisfechos completamente por los valores mínimos y máximos de los números de Reynolds del modelo físico a escala 1:30 mostrados en la Tabla 3.4. El criterio señalado por Galloway (1982) no es satisfecho por el modelo de Guri, sin embargo los valores de la Tabla 3.4 están cercanos a los establecidos por Galloway (1982). Los valores de los números de Weber del modelo físico a escala 1:30 mostrados en la Tabla 3.4 satisfacen los criterios mínimos para evitar efectos de tensión superficial establecidos por Daggett y Keulegan (1974), Padmanbhan y Hecker (1984), Jain (1.978), Linblom (1987) y Fattah (2003). Sin embargo, los criterios de Anwar, Wéller y Amphellett (1980) y Anwar (1978) se encuentran muy cercanos a los valores mínimos del número de Weber del modelo de la Tabla 3.4. No obstante, el modelo físico a escala 1:30 cumple con la gran mayoría de los criterios mínimos establecidos experimentalmente para evitar efectos viscosos y de tensión superficial en el modelaje de vórtices de superficie mostrados en la Tabla 3.1 y 3.2, por lo tanto, no se esperan efectos de escala durante los experimentos.

3.8.1 Ubicación del Filtro Amortiguador

La función del filtro amortiguador aguas arriba de la toma es disipar el exceso de energía cinética que ingresa a través de la compuerta de aducción al tanque, mediante la interacción del flujo turbulento con un medio poroso. Este medio poroso, conformado por

espacios intersticiales, amortigua la fuerza del flujo y garantiza una entrada completamente calmada aguas abajo del filtro. Sin embargo, la ubicación depende de la influencia que pueda tener sobre las condiciones de aproximación aguas arriba de la toma, de tal manera que se encuentre lo suficientemente alejado como para garantizar la correcta representación de las condiciones de aproximación en las inmediaciones de la toma y la completa disipación de energía aguas abajo de la compuerta de aducción.

Múltiples pruebas con el nivel del tanque en la elevación 240,00 m.s.n.m. y un flujo simétrico de aproximación a la toma (paralelo al eje de simetría de la toma), fueron ejecutadas variando la distancia de colocación del filtro amortiguador y el tamaño de piedra, el cual crea el medio poroso. El filtro fue colocado a 7D, 9,2D y 13,1D de la toma modificando el tamaño de piedra desde 2" hasta 6".

Las pruebas demostraron que los tamaños de piedra pequeños (Menores a 4") pueden disipar la energía del chorro, sin embargo, debido a los reducidos espacios intersticiales la diferencia de carga hidráulica en el medio poroso supera los 30 cm, para caudales superiores a los 0,0811 m³/s (400 m³/s prototipo), originando burbujeo y espuma aguas abajo del filtro amortiguador y las líneas de corriente en la superficie se tornan caóticas. Por otro parte, la piedra grande (6") garantiza una extraordinaria disipación de energía aguas abajo de la compuerta de aducción y no hay presencia de burbujeo aguas abajo del medio poroso.

Al colocar el filtro con piedra de 6" a 7D=2,45 m (73,5 m prototipo) se garantiza la disipación total de energía pero la cercanía evita que las líneas de corriente se acomoden naturalmente aguas arriba de la toma para caudales bajos, en cambio al colocar el filtro a 13,1D=4,58 m (137 m prototipo) el flujo turbulento de la compuerta de aducción choca directamente con el filtro y existe un gradiente de velocidades importantes en el fondo del canal.

El filtro situado a 9,2D=3,22 m (96,6 m prototipo) constituido por piedra picada de 6", demostró ser la mejor opción, debido a que ofrece buena disipación de energía del agua que ingresa al tanque y aguas abajo únicamente las líneas de corriente son influenciadas por la succión de la toma sumergida y no por el medio poroso del filtro amortiguador. La Figura 3.13a muestra la distribución de velocidades en el plano horizontal y vertical para 0,101 m³/s (500 m³/s prototipo) y la elevación 240,00 en el embalse.

En la Tabla 3.4 se aprecian los valores de las velocidades del modelo en tres dimensiones obtenidas con el medidor de velocidad por efecto Doppler. Las velocidades son cercanas a cero en las paredes y se aceleran en el medio del canal. El perfil vertical de velocidades confirma que el movimiento del agua es únicamente producto de la succión de la toma (Figura 3.13b).

TABLA 3.4.- Patrón de velocidades del modelo aguas abajo del filtro amortiguador.

	Medición El. 240,00			Medición El. 222,25			Medición El. 217,00		
X (m)	V_x (m/s)	V_y (m/s)	V_z (m/s)	V_x (m/s)	V_y (m/s)	V_z (m/s)	V_x (m/s)	V_y (m/s)	V_z (m/s)
0,55	0,001	0,002	0,001	0,007	-0,004	0,004	0,004	-0,001	0,004
1,09	0,012	-0,002	0,002	0,011	0,001	-0,017	0,015	-0,002	0,006
1,63	0,017	-0,002	0,001	0,014	-0,002	0,002	0,010	0,001	0,005
2,17	0,012	-0,005	0,004	0,009	-0,001	0,006	0,010	-0,001	0,006
2,71	0,011	-0,005	0,005	0,008	-0,001	0,006	0,010	-0,001	0,007
3,25	0,017	-0,002	0,000	0,013	-0,001	0,002	0,010	0,002	0,004
3,79	0,013	-0,001	0,002	0,011	0,001	-0,017	0,015	-0,002	0,005
4,33	0,000	0,002	0,001	0,006	-0,002	0,003	0,003	-0,000	0,003

3.8.2 Turbulencia

Posibles efectos de escala pueden estar presentes en el modelo hidráulico a escala 1:30 debido a que los números de Reynolds del modelo y el prototipo no son iguales. Sin embargo, estos efectos de escala son despreciables si los números de Reynolds del modelo y el prototipo están en régimen turbulento. El término efecto de escala se utiliza para justificar cualquier desviación de los resultados del modelo con respecto al prototipo. La turbulencia, el roce, la viscosidad, la tensión superficial y cualquier otro efecto del flujo de agua pueden considerarse como efectos de escala. Para despreciar los efectos de escala la escala del modelo hidráulico debe garantizar que todos los regímenes de trabajo del modelo estén dentro de los rangos normales de modelaje, que el flujo de agua no influya sustancialmente sobre los resultados de los ensayos y que el número de Reynolds en el modelo debe ser mayor al de la capa límite.

El prototipo opera en régimen completamente turbulento ($VD/\nu > 3,6 \cdot 10^7$), donde la resistencia hidráulica no depende del número de Reynolds sino de la magnitud de la velocidad a la segunda potencia, determinándose por el diagrama de Moody, el cual depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa de las paredes de la tubería. La rugosidad relativa es un valor equivalente de la granulometría que representa las irregularidades de la superficie que son cuantificadas mediante el coeficiente de resistencia hidráulica (k) mostrado en la Figura 3.14.

Al analizar el modelo hidráulico en la zona de posible formación de vórtices, desde la reja contra basura hasta la tubería forzada, las pérdidas de carga y nivel de turbulencia dependen en buena parte del material utilizado para la fabricación del modelo (Plexiglás), la reja contra basura, las ranuras de las compuertas, la transición, las juntas constructivas y detalles de acabado superficial correspondientes al manejo y ensamblaje de las piezas. Por lo tanto para ubicar el modelo con respecto a la zona turbulenta del prototipo es necesario determinar experimentalmente el coeficiente de resistencia hidráulica (Figura 3.14) del modelo a escala 1:30 mediante la expresión (3.19):

$$k = \frac{\sum h_f}{\frac{V^2}{2g}} = \frac{\Delta H}{\frac{V^2}{2g}} - 1 \quad (3.19)$$

Donde k es coeficiente de resistencia hidráulica, $\sum h_f$ es la pérdida de energía en el tramo de toma, $V^2/2g$ es la energía cinética, ΔH es la diferencia entre la línea de energía total y la altura piezométrica.

Con la toma completamente sumergida (Nivel del embalse $> 240,00$ m.s.n.m.) y estableciendo un flujo simétrico de aproximación con el nivel de agua permanente y constante en el tanque se varió el caudal desde $0,0405$ hasta $0,2840$ m³/s (Desde 200 hasta 1400 m³/s), correspondiente a Reynolds del modelo entre $0,15 \cdot 10^6$ y $1,03 \cdot 10^6$, con el propósito de determinar el ΔH y el comportamiento de las curvas de resistencia hidráulica (k) para las siguientes configuraciones:

1. Toma y reja contra basura sin compuertas colocadas en las ranuras.
2. Toma y reja contra basura con compuertas colocadas en las ranuras.
3. Toma sola sin compuertas colocadas en las ranuras.
4. Toma sola con compuertas colocadas en las ranuras.

Utilizando la batería de 16 piezómetros alrededor del perímetro de la tubería forzada ubicados a 0,55 m del codo convergente de sección circular se determinó la diferencia de carga piezométrica entre el embalse y la sección de medición; y con el medidor de caudal electromagnético se determinó la cantidad de flujo volumétrico que circula por el experimento.

La Figura 3.15 muestra las curvas de ΔH y $V^2/2g$ para las configuraciones 1 y 3, donde la curva A pertenece a la toma y reja contra basura sin compuertas colocadas en las ranuras y la curva B corresponde a la toma sola sin compuertas colocadas en las ranuras. La diferencia entre las curvas 1 y 3, y 2 y 4 representan el coeficiente de resistencia hidráulica de la reja contra basura con respecto a la velocidad media de la tubería forzada. Las curvas son válidas hasta el caudal de $0,0405 \text{ m}^3/\text{s}$ ($VD/v=0,15 \cdot 10^6$) pero fueron extrapoladas hasta $0 \text{ m}^3/\text{s}$ con el propósito de cotejar las curvas para caudales menores a los experimentales. Las curvas son asintóticas a medida que el Reynolds es mayor, sin embargo como se aprecia en la Figura 3.16, el efecto hidráulico que produce la colocación de las compuertas en las ranuras provoca que las curvas 2 y 4 consigan el comportamiento asintótico mas lento que las curvas 1 y 3. Esto se debe a que la columna de agua dentro de las ranuras está sometida a la presión atmosférica y a pequeñas fluctuaciones pulsante que hacen descender y ascender periódicamente el nivel de agua dentro de las ranuras producto del régimen turbulento que se genera dentro de la toma. Al colocar las compuertas en las ranuras la dinámica de las fluctuaciones persiste pero de forma más amortiguada debido a que el área efectiva de la ranura disminuye por la presencia de las compuertas, y por consecuencia el aire que ocupa el espacio vació durante el descenso de la columna de agua que ingresa con mayor lentitud al interior de la ranura.

La Tabla 3.5 muestra la diferencia entre los coeficientes de resistencia hidráulica en el rango de operación de las turbinas. Las curvas 1 y 3 presentan una diferencia inferior a 0,02 por lo tanto ambas curvas pueden considerarse asintóticas, constantes e independiente del número de Reynolds y por lo tanto la influencia de la viscosidad es despreciable. Las curvas 2 y 4 tienen una variación mayor que las curvas 1 y 3 ($\Delta k < 0,045$), sin embargo pueden considerarse cuasi-asintóticas debido a que la geometría de la toma está influenciada por la colocación de las compuertas de toma lo cual no es una condición de operación normal.

TABLA 3.5.- Coeficiente de resistencia hidráulica para el rango de operación.

Curva	k		Δk
	$Q_{\text{prototipo}} = 300 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{\text{prototipo}} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$	
1	0,220	0,204	0,016
2	0,268	0,223	0,045
3	0,136	0,126	0,010
4	0,189	0,145	0,044

Estrictamente hablando, las curvas de resistencia hidráulica (Figura 3.16) confirman que el modelo hidráulico a escala 1:30 gobernado por la ley de similitud de Froude se ubica en la zona turbulenta donde las pérdidas de energía no dependen de la viscosidad del fluido y por lo tanto es razonable concluir que no hay efectos de escala y es de esperar que los patrones de flujo del modelo sean similares a los del prototipo.

3.8.3 Reja Contra Basura

La Sección 3.6.2 describe el criterio de conservación de áreas utilizado para representar la reja contra basura en el modelo hidráulico a escala 1:30, sin embargo no es hasta ahora cuando podemos validar este criterio. El coeficiente (k_t) de resistencia hidráulica de la reja contra basura es generalmente expresado en términos de la geometría de la reja; en el prototipo está formada por barras de acero soldadas de diferente espesor espaciadas como se muestra en la Figura 3.7a.

El United States Department of the Interior (1974) utiliza la expresión (3.20) para calcular el coeficiente (k_t) promedio con respecto a las áreas características de la reja contra basura.

$$k_t = 1,45 - 0,45 \frac{A_n}{A_g} - \left(\frac{A_n}{A_g} \right)^2 \quad (3.20)$$

Donde A_n es el área libre donde el flujo de agua pasa a través de la reja contra basura y A_g es el área total ocupada por la reja contra basura.

La Tabla 3.6 muestra las áreas características que definen el coeficiente de resistencia hidráulica teórico promedio en el modelo y el prototipo. Desde el punto de vista teórico es completamente válido asumir como similares ambos coeficientes.

TABLA 3.6.- Coeficiente de resistencia teórico.

	A_n (m ²)	A_g (m ²)	k_t
Modelo Hidráulico	0,322	0,599	0,91
Prototipo	293,9	537,5	0,90

Desde el punto de vista práctico el coeficiente (k_t) del prototipo es difícil de determinar, sin embargo comprobaciones geométricas ejecutadas en campo (Figura 3.7a) e investigaciones realizadas en los diseños desarrollados por Harza Engineering Company (1975) confirmaron que el coeficiente (k_t) del prototipo es 0,90 tal y como lo muestra la Tabla 3.6.

El proceso constructivo de la reja contra basura en el modelo físico involucró gran dificultad sobre todo con la soldadura y las uniones entre los elementos, lo que podría inducir a pequeñas variaciones en el coeficiente de resistencia hidráulica teórico del modelo mostrado en la Tabla 3.6. El United State Department of the Interior (1974) establece las pérdidas de energía de la reja mediante la ecuación (3.21):

$$\Delta H_t = k_t \frac{V_n^2}{2g} \quad (3.21)$$

Donde ΔH_t es la pérdida de carga de la reja y se calcula restando las curvas A y B de la Figura 3.15 y V_n es la velocidad media a través de la reja contra basura ($V_n = Q / A_n$).

La Figura 3.17, muestra la curva del coeficiente (k_t) de resistencia hidráulica de la reja contra basura del modelo a escala 1:30, la cual es asintótica a medida que el caudal es mayor. Para el caudal del modelo 0,28 m³/s el valor de k_t es 0,86. En la zona de operación de la turbina el valor k_t se encuentra entre 0,89 y 0,88 cuyos valores son cercanos a los del prototipo y similares al valor teórico del modelo expresado en la Tabla 3.6; por lo tanto se concluye que el criterio de conservación de áreas utilizado para elaborar la reja contra basura del modelo es hidráulicamente semejante a la reja del prototipo y por consiguiente es razonable asumir que los patrones de flujo del modelo y el prototipo son análogos.

3.8.4 Correlación de Vórtices

Investigaciones documentales realizadas en el Centro de Documentación de CVG EDELCA indicaron que en mayo de 1985 durante la prueba de la turbina 11 cuando el nivel del embalse estaba en la elevación 238,50 fueron reportados remolinos en la superficie del agua (Tabla 3.7) en las zonas circundantes a la toma. Los remolinos aparecieron desde la condición de 43% (Apéndice 5) de apertura de las paletas directrices correspondiente a una potencia de salida de 200 MW y 260 m³/s. En la Casa de Máquinas 2 únicamente se encontraba operando la turbina 11 y el resto se encontraban cerradas. La hidrodinámica del flujo aguas arriba de la toma es muy similar al Caso 1 ó 3 mostrado en el Capítulo 2, donde las líneas de corriente son cuasi-paralelas a la orientación de la toma.

Observaciones ejecutadas durante la finalización del período de verano del año 2003, entre los meses de abril y mayo, registraron la presencia de remolinos de superficie acompañados por eventuales depresiones de la superficie del agua, aguas arriba de las tomas 11 y 15. Las observaciones fueron asociadas a vórtices Tipo 1 y 2 (Tabla 3.7) con un comportamiento inestable e intermitente cerca del vano derecho de las tomas (Figura 3.18 y 3.19). Durante el desarrollo de las observaciones las turbinas 11 y 15 a la 18 se encontraban en funcionamiento correspondiente a una condición hidrodinámica equivalente al Caso 1, descrito en el Capítulo 2.

TABLA 3.7.- Registro histórico de vórtices en el prototipo.

Fecha	El. Embalse (m.s.n.m)	Q_{prototipo} (m³/s)	Toma No.	Tipo de Vórtice
Marzo 1985	238,50	260,0	11	1
Abril 2003	244,64	450,0	11	1 – 2
Mayo 2003	244,52	490,0 – 479,0	11 – 15	1 – 2

Similares escenarios a los detallados en la Tabla 3.7 fueron reproducidos en el modelo hidráulico a escala 1:30 manteniendo un flujo en el tanque aguas arriba, paralelo a la orientación de la toma. La Figura 3.20 muestra el escenario planteado en marzo de 1985 (Tabla 3.7) en el modelo a escala 1:30, donde se observó la aparición de un remolino débil

intermitente el cual se mueve de forma errática hacia ambos lados de la toma muy cerca de la pared de plexiglás la cual representa el monolito de concreto de la Casa de Máquinas 2. La Figura 3.21, expone la aparición de vórtices 1 y 2 en el vano derecho de la toma del modelo a escala 1:30. Los remolinos y las depresiones se desplazan de forma aleatoria aguas arriba de la toma, desapareciendo intermitentemente durante las observaciones. La superficie del agua es cristalina y no hay indicios de formación de espuma como ocurre en el prototipo (Figuras 3.18 y 3.19), esto se debe a que el número de Weber del modelo es menor que el prototipo, y como consecuencia la energía de circulación liberada por el modelo es menor en proporción que la del prototipo. Sin embargo, la correlación modelo y prototipo es muy buena, debido a que el modelo pudo simular las condiciones de formación de vórtices observadas en el prototipo, por lo tanto es preciso concluir que el modelo tiene la capacidad de simular la formación de vórtices de superficie en el embalse.

3.9 RESULTADOS

Estudios experimentales fueron desarrollados para obtener los resultados. Durante la investigación se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (Caudal y nivel de agua) para analizar las consecuencias de esa manipulación sobre una o más variables dependientes (Vórtices y arrastre de aire), dentro del sistema, calibrado, validado y controlado por el investigador. El experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes. Los Casos 1, 2 y 3 desarrollados en el Capítulo 2, se utilizarán para representar la aproximación de las líneas de flujo aguas arriba de la toma (Flujo simétrico y lateral de aproximación), en el modelo hidráulico a escala 1:30, por lo tanto, se analizarán 3 experimentos los cuales definirán por completo el universo de posibilidades de ocurrencia de vórtices y arrastre de aire para las tomas de Casa de Máquinas 2.

Los experimentos consistirán en imponer una condición de caudal e ir variando de forma estacionaria (régimen permanente) el nivel de agua en el tanque entre las elevaciones 256,00 y 230,00 m.s.n.m., con la finalidad de observar los fenómenos hidráulicos en la superficie libre del agua y dentro de la toma, midiendo las velocidades y caídas de presión a lo largo del sistema en estudio. Posteriormente, se impondrá un nuevo caudal y nuevamente se variará estacionariamente la elevación del agua en el tanque. El rango de caudales será

variado desde 300 hasta 600 m³/s, zona en la que suelen operar las turbinas, y luego se exagerará el caudal entre 600 y 1400 m³/s para verificar el comportamiento hidrodinámico al utilizar el criterio de igualación de velocidades, aún cuando se demostró que el modelo hidráulico a escala 1:30 no tiene efectos de escala y por lo tanto la similitud geométrica, cinemática y dinámica son indiscutibles.

Los experimentos fueron divididos en dos etapas, con el propósito de facilitar la comprensión de los resultados: 1) Estudio aguas arriba de la toma, y 2) Estudio dentro de la toma.

3.9.1 Estudio Aguas Arriba de la Toma

Varios investigadores han propuesto curvas guías para diseñar tomas sin vórtices. Todas las curvas guías relacionan la sumergencia crítica (h/D_{cr}) requerida para evitar vórtices tipo 5 y 6 con respecto al número de Froude o el caudal, sin incluir la medición de la circulación debido a que es un parámetro difícil de medir e interpretar. Sin embargo, la curva guía de Gordon (1970) considera la circulación mediante el estudio de las condiciones de aproximación simétrica y lateral de las líneas de corriente. También, la geometría específica de la toma juega un papel importante en el desarrollo de los vórtices debido a que las líneas de corriente se distorsionan conforme a la forma de la entrada de la tubería. La Figura 3.22 muestra las curvas guías seleccionadas por Kanuss (1987) para evitar formación de vórtices tipo 5 y 6 en tomas sumergidas las cuales son referencia importante para el diseño de entradas de agua. Las curvas son envolventes elaboradas mediante la observación de distintos proyectos alrededor del mundo y la experiencia en el modelaje hidráulico de vórtices en modelos a escala reducida. La Figura 3.22 muestra que las tomas que operan por encima de las curvas guías no deben tener problemas de formación de vórtices dañinos (Tipo 5 y 6) y los que están por debajo de las curvas guías estarían propensos a la ingesta de aire por causa de los vórtices de superficie.

Si utilizáramos la curva de Gordon (1970) para predecir la sumergencia crítica de las tomas de Guri, en el rango de operación de las turbinas, se pudiera inferir que las tomas no deberían formar vórtices de superficie tipo 5 y 6, asumiendo que el flujo de aproximación es completamente lateral a la toma. Así mismo, las curvas restantes de la Figura 3.22 confirman que las tomas de Guri no deberían tener problemas de formación de

vórtices. Sin embargo, diversos investigadores coinciden en que si la predicción del vórtice es crítico o crucial para la operación de un proyecto, es necesario construir un modelo físico para garantizar la no ingesta de aire hacia las turbinas por causa de los vórtices.

Para esta etapa de experimentos se mantiene sumergida completamente la toma. Por tal motivo se varió el nivel del embalse desde la elevación 255,00 m.s.n.m. hasta el tope superior de la toma, El. 236,69, cambiando estacionariamente el caudal.

Caso 1: Las líneas de flujo (Figura 2.12) se acomodan cuasi-paralelas al eje de la toma. Para simular este caso, se estableció un flujo simétrico, franco hacia la toma, para ello se retiraron los álabes móviles semi-sumergidos. Mediciones de velocidades demostraron (Figura 3.23) que las líneas de flujo son similares a las reportadas por el modelo matemático para la toma No. 15 cerca del eje central de la toma donde el flujo es bidimensional y simétrico al eje de la toma.

Las Figura 3.24 muestra el gráfico de Kanuss (1987) con las observaciones desarrolladas para el Caso 1. La curva guía para flujo simétrico de aproximación (Figura 3.22) de Gordon (1970) envuelve la ocurrencia de los vórtices tipo 3, 4, y 5. Los vórtices más fuertes ocurren para caudales exagerados, fuera del rango de operación de las turbinas.

La Figura 3.25 muestra la superficie del agua libre de vórtices, aguas arriba de la toma para $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,121 \text{ m}^3/\text{s}$ modelo) y la elevación 240,00 m.s.n.m. Para el rango de operación de la turbina existe una ligera circulación en la superficie y en ocasiones pueden notarse remolinos (Vórtice tipo 1) en el agua de forma intermitente. Al exagerar el caudal (Criterio de igualación de velocidades) se presentan vórtices tipo 5 a partir de $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,243 \text{ m}^3/\text{s}$ modelo). La Figura 3.26 muestra la formación de un vórtice tipo 5 en la superficie del agua para $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,284 \text{ m}^3/\text{s}$ modelo) y El. 237,00. Estos vórtices aparecen en ambos vanos de la toma muy cerca de pared vertical de plexiglás. El vórtice del vano derecho gira en sentido anti-horario y del vano izquierdo gira en sentido horario con diámetros inferiores a los 0,45 m (1,5 cm modelo).

Caso 2: Las líneas de flujo se aproximan del lado izquierdo (Figura 2.13) de la toma con ángulos de ataque entre 30 y 45° con respecto al eje de la toma. Se colocaron los álabes semi-sumergidos aguas arriba de la toma, como se muestra en la Figura 3.27, para lograr la

condición de aproximación de las líneas de flujo, análogas a las del modelo matemático. Mediciones de velocidades aguas abajo de los álabes móviles confirmaron la similitud entre las líneas de corriente del modelo hidráulico y el modelo matemático. La Figura 3.28 muestra las observaciones realizadas en el modelo para el Caso 2.

No se observaron vórtices mayores a tipo 3 en el rango de operación de las turbinas. La mayor parte de los vórtices en este rango de caudales son tipo 1 y 2, sin embargo para la elevación 237,00 aparecieron vórtices tipo 3 intermitentes. Al exagerar el caudal ($F_r > 0,69$) la ocurrencia de los vórtices es mas frecuente y la intensidad y fuerza son mayores. La Figura 3.29 muestra un vórtice tipo 6 permanente en el vano izquierdo con rotación anti – horaria para la elevación 237,00 y $800 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,162 \text{ m}^3/\text{s}$ modelo). La Figura 3.30 muestra un vórtice tipo 5 en la superficie del agua en el vano izquierdo de la toma girando en sentido anti-horario. Los diámetros promedios de los vórtices no supera los 1,2 m (4 cm modelo).

Todas las circulaciones, remolinos y vórtices de superficie se ubican en el vano izquierdo y giran en sentido anti-horario debido a que las líneas de flujo tienden a pre-rotar la superficie del agua en el área de influencia de la toma. La intensidad de los vórtices es mayor que en el Caso 1, sin embargo en el rango de operación de la turbina no existen vórtices que puedan arrastrar aire hacia la tubería forzada.

Caso 3: Al igual que en el Caso 2, las líneas de flujo se aproximan del lado izquierdo (Figura 2.14) de la toma pero con ángulos de ataque entre 60 y 70° con respecto al eje de la toma. Se modificó el ángulo de ataque de los álabes semi-sumergidos aguas arriba de la toma, como se muestra en la Figura 3.31, para lograr la condición de aproximación de las líneas de flujo, análogas a las del modelo matemático. La Figura 3.30 muestra las observaciones realizadas en el modelo para el Caso 3.

Esta condición hidrodinámica es más severa que las anteriores, debido a que las líneas de flujo de aproximación se encuentran más esviadas con respecto a la toma que en los Casos anteriores. Sin embargo, los experimentos indican (Figura 3.32) que no hay vórtices que puedan arrastrar aire en el rango de operación de la turbina. Los vórtices son del tipo 1 y 2 e intermitentes para cotas del agua cercanas a la El. 236,69.

Para caudales mayores a $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,121 \text{ m}^3/\text{s}$) la intensidad de los vórtices es mayor que en los dos Casos anterior e inclusive puede escucharse el ruido de succión de aire para los vórtices tipo 5 y 6. Estos vórtices aparecen a partir de $710 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,144 \text{ m}^3/\text{s}$ modelo) y giran en sentido anti-horario en el vano izquierdo de la toma alcanzando diámetros inferiores a los 2,0 m (6 cm modelo).

La Figura 3.33 muestra remolinos (Vórtice tipo 1) cerca de la pila central para $600 \text{ m}^3/\text{s}$ y 237 m.s.n.m. Las Figuras 3.34 y 3.35 muestran vórtices tipo 5 y 6 respectivamente para la El. 255,00, ambos vórtices giran en sentido anti-horario y tienen la capacidad de arrastrar aire hacia la tubería forzada.

La Tabla 3.8 resume las observaciones más significativas encontradas durante los experimentos, las cuales demuestran que para caudales inferiores a $600 \text{ m}^3/\text{s}$ no existe formación de vórtices tipo 5 ó 6 que puedan colocar en peligro la turbina.

TABLA 3.8.- Resumen de ocurrencias de vórtices de superficie más significativas.

Rango de Operación	El. del agua (m.s.n.m.)	Máximo tipo de vórtices / Ocurrencia		
		Caso1	Caso2	Caso3
300<Q<600	255,0	-	-	-
	246,0	-	-	Tipo 2 / e
	237,0	Tipo 1 / i	Tipo 3 / e	Tipo 2 / i
600<Q<1000	255,0	Tipo 2 / e	Tipo 2 / p	Tipo 4 / f
	246,0	Tipo 2 / f	Tipo 5 / i	Tipo 6 / cp
	237,0	Tipo 4 / i	Tipo 6 / cp	Tipo 6 / p
1000<Q<1400	255,0	Tipo 2 / e	Tipo 2 / i	Tipo 6 / p
	246,0	Tipo 2 / f	Tipo 5 / f	Tipo 6 / p
	237,0	Tipo 5 / cp	Tipo 6 / p	Tipo 6 / p

e = esporádico; i = intermitente; f = frecuente; cp = cuasi – permanente; p = permanente.

3.9.1 Estudio Dentro de la Toma

El agua dentro de la toma está en contacto con aristas vivas, como las ranuras de las compuertas que pueden ser estructuras generadoras de vórtices por corte y burbujas. Debido a que los experimentos realizados aguas arriba de la toma señalaron que en el rango de operación de las turbinas no existe formación de vórtices dañinos que puedan arrastrar aire hacia la tubería forzada se decidió realizar un conjunto de ensayos para establecer el límite inferior de operación de la toma para que no exista arrastre de aire hacia la turbina.

Observaciones repetitivas realizadas dentro de la toma para el rango de niveles entre 255,00 y 240,00 m.s.n.m. señalaron que no existen indicios de arrastre de aire hacia la turbina por causa de vórtices por corte formados por la interacción del agua con la forma específica de la toma o burbujas formadas en la reja contra basura. Se adoptó el sistema de clasificación de vórtices por sumergencia para catalogar los vórtices por corte debido a que la intensidad y fuerza causan similares daños en las turbinas y la diferencia radica en el mecanismo de formación de ambos.

Para esta etapa de experimentos, se varia la elevación del embalse desde la cota 240,00 hasta la cota 230,00 m.s.n.m. correspondiente a la caída neta mínima permitida para las turbinas Francis re-potenciadas de Casa de Máquinas 2 (Apéndice 4). Los caudales de los experimentos se variaron estacionariamente desde 300 hasta 700 m³/s y luego hasta 1400 m³/s (rango de caudal exagerado) con el labio inferior de la compuerta de servicio colocada en la elevación 232,00 m.s.n.m (Ranura 2) y el resto de las ranuras sin compuertas. Observaciones visuales sistemáticas desarrolladas dentro de la toma demostraron que no existe una influencia significativa de la dirección del flujo de aproximación (Casos 1, 2 y 3) aguas arriba de la toma sobre el comportamiento hidrodinámico dentro de la toma para las elevaciones entre 255,00 y 230,00 m.s.n.m.

La Figura 3.36 muestra un tren de ondas estacionarias aguas arriba de la reja contra basura, producidas por el choque de la superficie libre del agua contra el techo de la toma cuando el nivel de agua en el embalse es menor a la elevación 236,69 m.s.n.m. Este tren de ondas inhibe la formación de vórtices en la superficie del agua, aguas arriba de la toma cuando la toma está parcialmente sumergida.

La Figura 3.37 muestra la variación de la elevación del agua en las ranuras de las compuertas de mantenimiento (Ranura 1), servicio (Ranura 2) y emergencia (Ranura 3). A

medida que el caudal aumenta existe una mayor diferencia de carga hidráulica entre el nivel de agua en las ranuras y el embalse, debido a que las pérdidas de carga son proporcionales al cuadrado de la velocidad. Las curvas muestran que para niveles inferiores a la cota 232,00, la elevación del agua en las ranuras 1 y 2 son similares y la mitad de la toma trabaja con superficie libre.

Múltiples observaciones fueron realizadas para establecer el rango de ocurrencia de los vórtices y arrastre de aire. La Tabla 3.9 muestra el resumen de las observaciones más relevantes dentro del rango de operación de la turbina para elevaciones entre 240,00 y 230,00 y caudales inferiores a 700 m³/s. Esta Tabla es de suma importancia debido a que fue elaborada mediante repetitivas observaciones sustentadas por videos y fotografías tomadas a través de las paredes de plexiglás del modelo hidráulico. Estos videos y fotografías sirvieron para determinar el diámetro aproximado de los vórtices y las burbujas que se forman en las ranuras y en la reja contra basura en el modelo. Es importante señalar que los valores obtenidos para el diámetro aproximado de las burbujas se refieren al modelo, debido a que para ser escalados a valores de prototipo se debe realizar un análisis exhaustivo de las fuerzas Eulerianas en el modelo físico y su comprensión y estudio podría ser tan extenso como lo es la teoría de modelaje de vórtices.

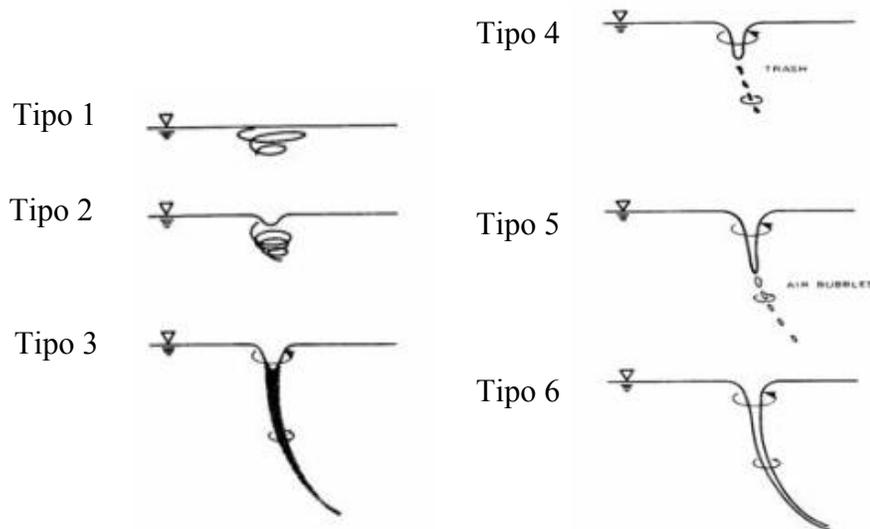
Las curvas desarrolladas en la Figura 3.38 fueron elaboradas con las observaciones de la Tabla 3.9. Los vórtices por corte tipo 1 y 2 comienzan a partir de la elevación del embalse 237,00 y aumentan su intensidad a medida que el nivel del embalse disminuye. Las regiones donde aparecen los vórtices 4 y 5 representan el límite inferior para operar la turbina sin problemas de arrastre de aire por causa de los vórtices en las ranuras.

La Figura 3.39 muestra las zonas de ocurrencia de vórtices por corte en las ranuras, formación de burbujas de aire y el arrastre de aire hacia la tubería forzada. En la zona 1, no hay vórtices ni arrastre de aire hacia la turbina. En la zona 2, se forman vórtices tipo 1 y 2 en las ranuras, los cuales no arrastran aire, sin embargo existe formación de burbujas y bolsas de aire en la reja contra basura las cuales viajan con el flujo de agua pero suben por las ranuras de las compuertas. En Zona 3, comienza el problema de arrastre de aire hacia aguas abajo y en la zona 4 el arrastre de aire se vuelve más severo. De la Figura 3.39 se puede inferir que las turbinas podrán ser operadas hasta la zona 2 sin problemas de arrastre de aire.

TABLA 3.9.- Resumen de observaciones dentro de la toma

Q_{prot} (m^3/s)	Nivel del embalse (m.s.n.m.)				
	240,00	237,00	235,00	232,00	230,00
300	No hay burbujas en reja. No hay vórtices en ranuras	No hay burbujas en reja. No hay vórtices en ranuras.	No hay burbujas en reja. Vórtices tipo 3 y 4 en la ranura 1, $\phi_v < 2\text{cm}$.	Formación esporádica de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Todas suben por las ranuras 2 y 3. Vórtices tipo 4 en la ranura 2, $\phi_v < 2\text{cm}$.	Formación frecuente de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 2, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 3\text{mm}$. La mayor parte de las burbujas son arrastradas hacia la turbina.
400	No hay burbujas en reja. No hay vórtices en ranuras	Formación esporádica de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Son muy pocas. Todas suben por las ranuras 1, 2 y 3. No hay vórtices en ranuras	No hay burbujas en reja. Vórtices tipo 4 en ranura 1, $\phi_v < 2\text{cm}$.	Formación frecuente de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 2, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 3\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.	Formación continua de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 2, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 3\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.
500	No hay burbujas en reja. No hay vórtices en ranuras	Formación frecuente de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Son muy pocas. Todas suben por las ranuras 1, 2 y 3. No hay vórtices en ranuras	Formación esporádica de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 1, $\phi_v < 2,6\text{cm}$. Todas las burbujas ($\phi_b < 2\text{mm}$) suben por las ranuras 2 y 3.	Formación continua de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 2, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 4\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.	Formación continua de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 3, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 4\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.
600	No hay burbujas en reja. No hay vórtices en ranuras	•Formación continua de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Son pocas. Algunas suben por las ranuras y otras son arrastradas hacia la turbina. No hay vórtices en ranuras	Formación frecuente de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 1, $\phi_v < 2,6\text{cm}$ y $\phi_b < 3\text{mm}$. La mayor parte de las burbujas son arrastradas hacia la turbina.	Formación severa de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 2, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 4\text{mm}$. Todas las burbujas son arrastradas hacia la turbina.	Formación severa de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 3, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 4\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.
700	Formación esporádica de burbujas en reja, $\phi_b < 2\text{mm}$. Son muy pocas. Todas suben por las ranuras 1, 2 y 3. No hay vórtices en ranuras	Formación continua de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Son muchas. Algunas suben por las ranuras y otras son arrastradas hacia la turbina. No hay vórtices en ranuras	Formación frecuente de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 1, $\phi_v < 2,6\text{cm}$ y $\phi_b < 4\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.	Formación severa de burbujas en reja, $\phi_b < 3\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 2, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 4\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.	Formación severa de burbujas en reja, $\phi_b < 4\text{mm}$. Vórtices tipo 5 en ranura 3, $\phi_v < 2,6\text{cm}$, $\phi_b < 4\text{mm}$. Las burbujas son arrastradas hacia la turbina.

ϕ_v = Diámetro del vórtice por corte en el modelo; ϕ_b = Diámetro de la burbuja en el modelo.



Tipo 1: Remolino en la superficie del agua; Tipo 2: Remolino y depresión en la superficie del agua; Tipo 3: Vórtice en forma de cono de agua; Tipo 4: Arrastre de basura flotante; Tipo 5: Arrastre de burbujas; Tipo 6: Núcleo de aire conectado a la toma.

FIGURA 3.1.- Clasificación del tipo de vórtice según “Alden Research Laboratory”

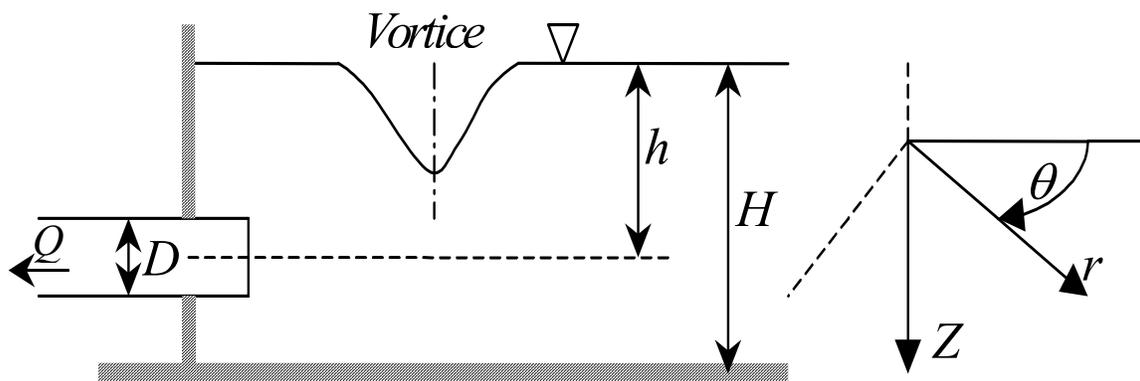


FIGURA 3.2.- Variables que definen la formación de vórtices en tomas horizontales

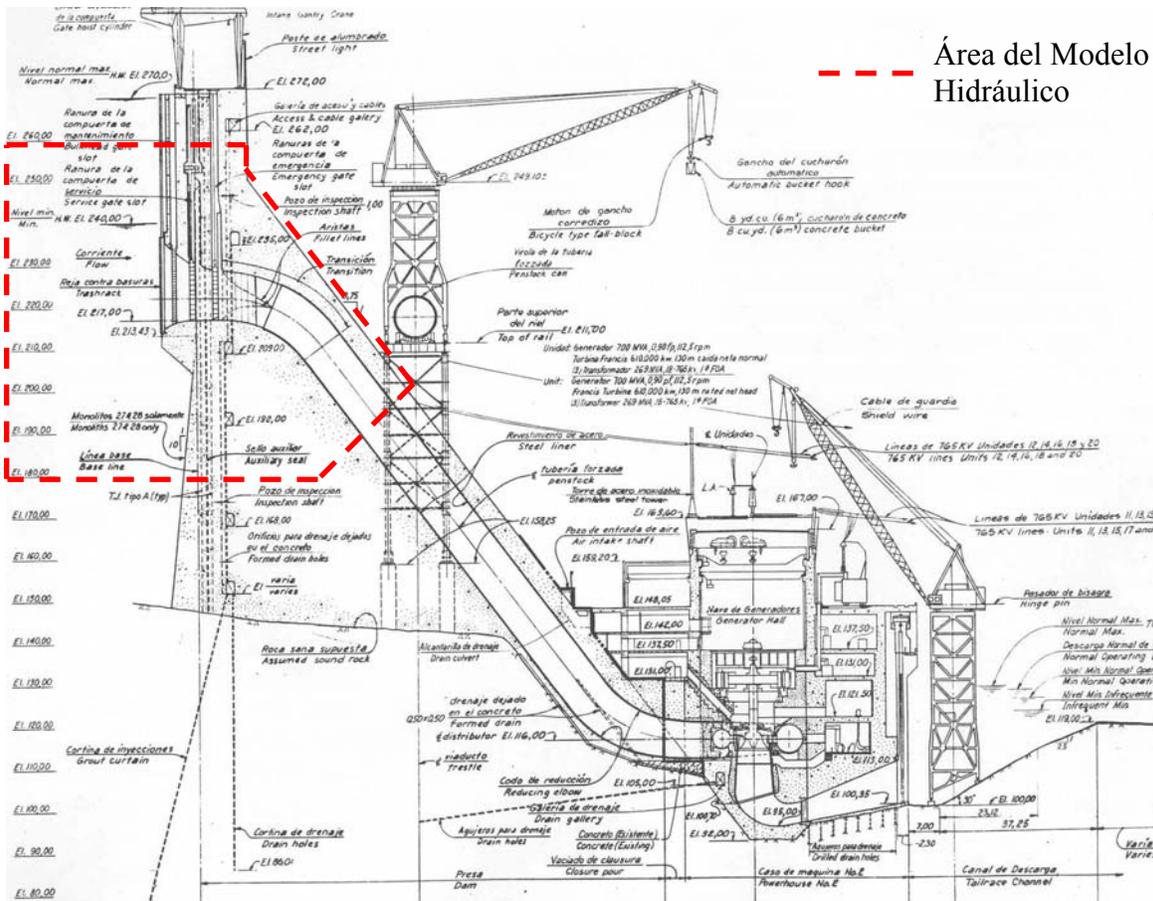


FIGURA 3.3.- Área de la toma representada en el modelo hidráulico

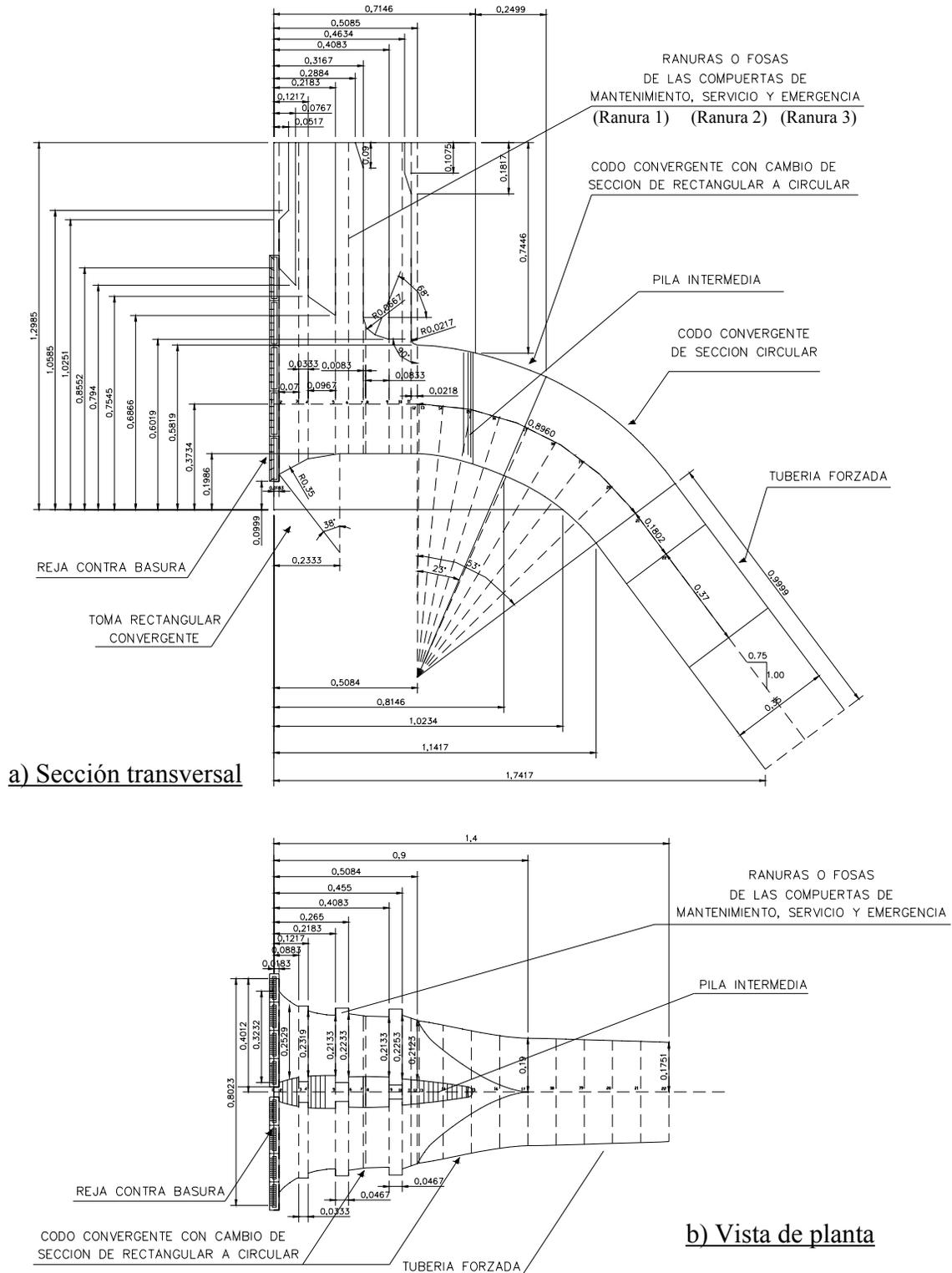


FIGURA 3.4.- Plano de la toma en el modelo a escala 1:30

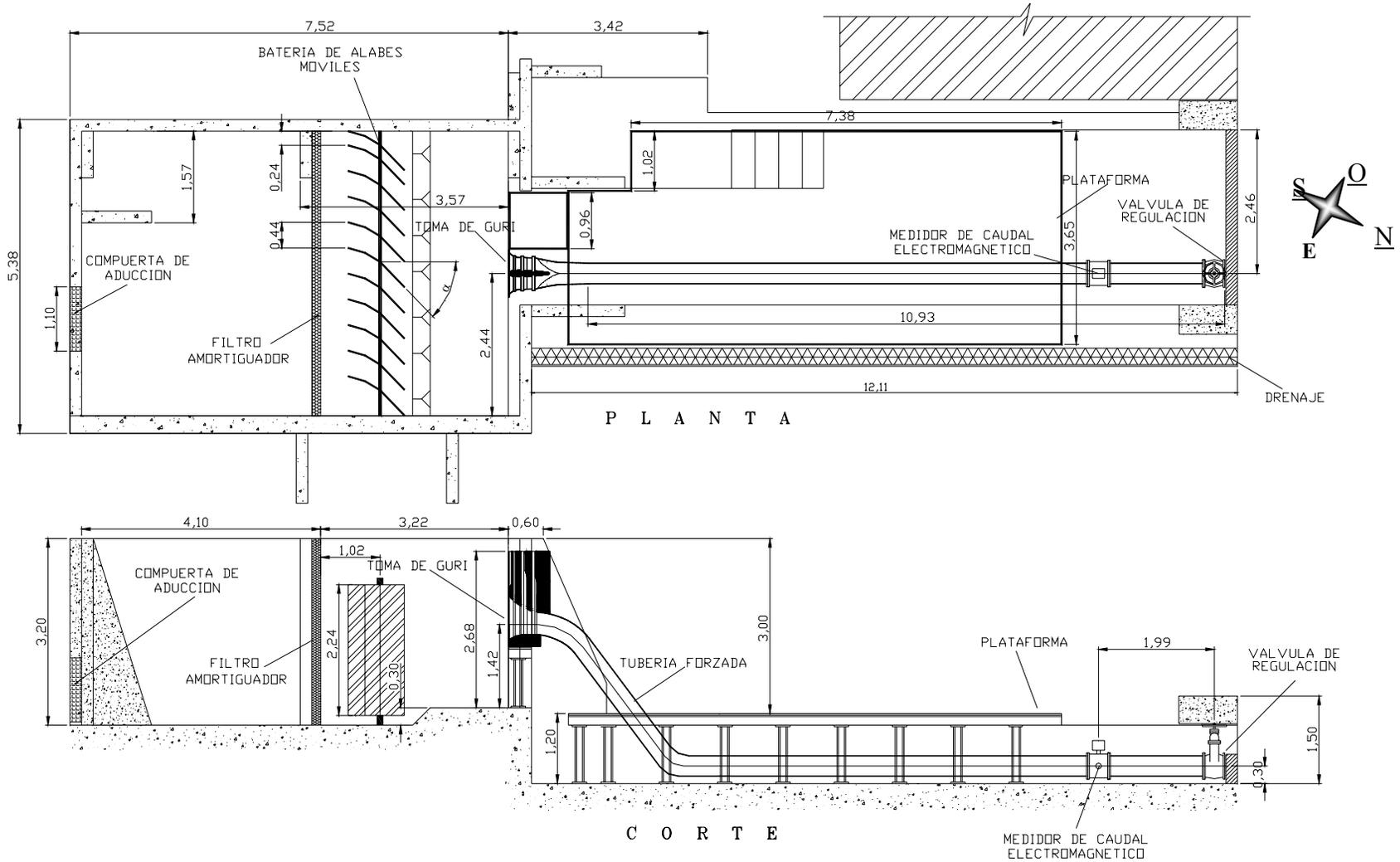
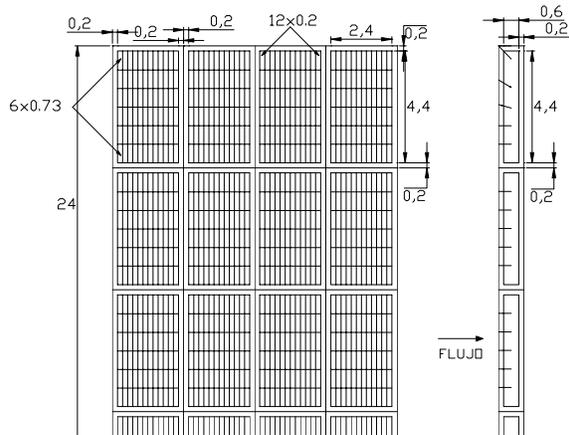


FIGURA 3.5.- Vista general del modelo hidráulico a escala 1:30

a) Reja contra basura del prototipo

$$\frac{A_{libre}}{A_{obs}} = 1,20$$

b) Reja contra basura del modelo 1:30

$$\frac{A_{libre}}{A_{obs}} = 1,17$$

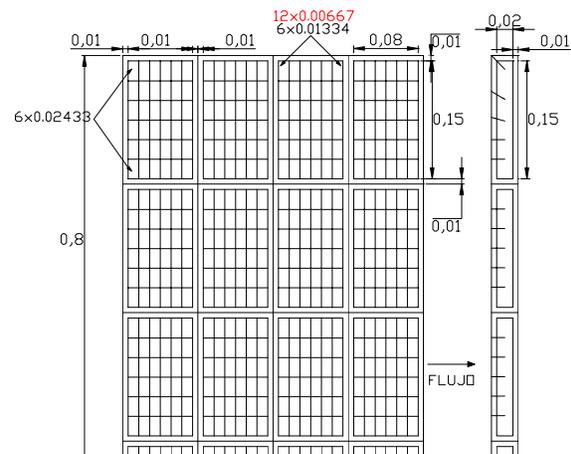


FIGURA 3.6.- Arreglo general de reja contra basura-prototipo y modelo

a) Reja prototipo



b) Reja modelo

FIGURA 3.7.- Disposición de rajas contra basura - prototipo y modelo

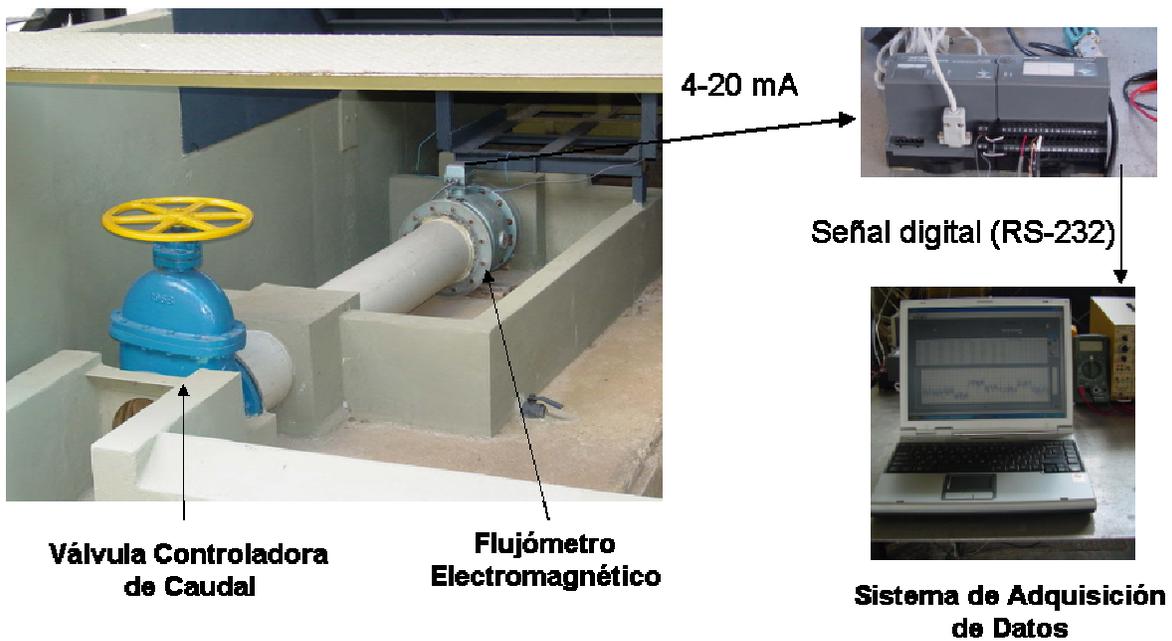


FIGURA 3.8.- Esquema de regulación y medición de caudal

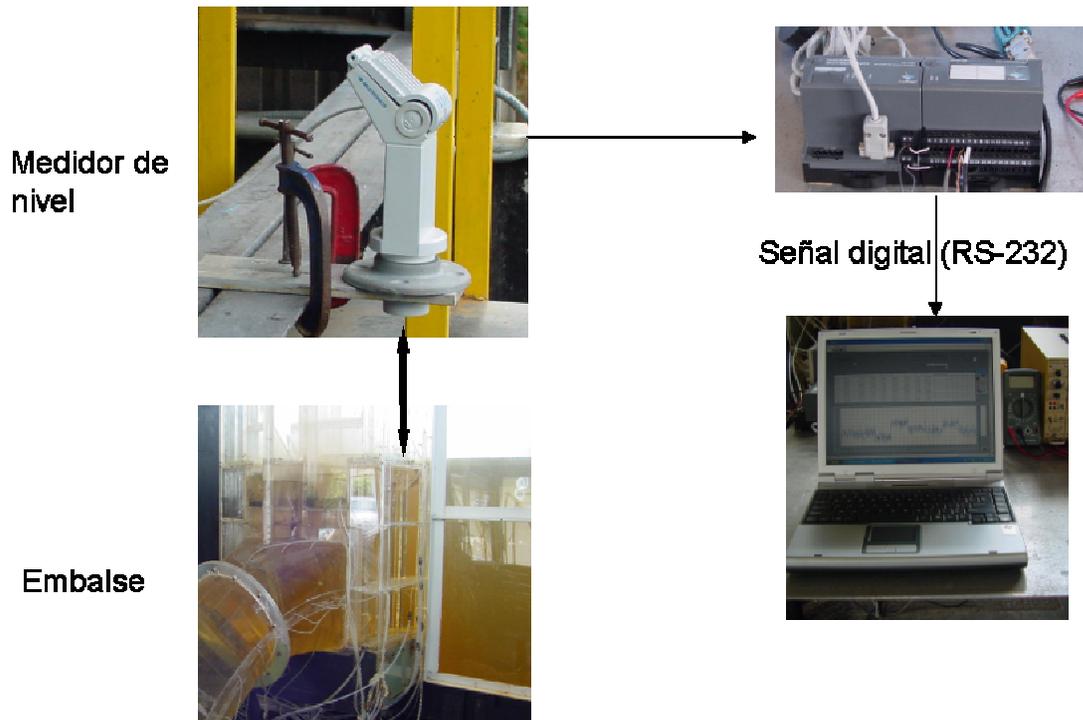


FIGURA 3.9.- Esquema de monitoreo de nivel en el embalse

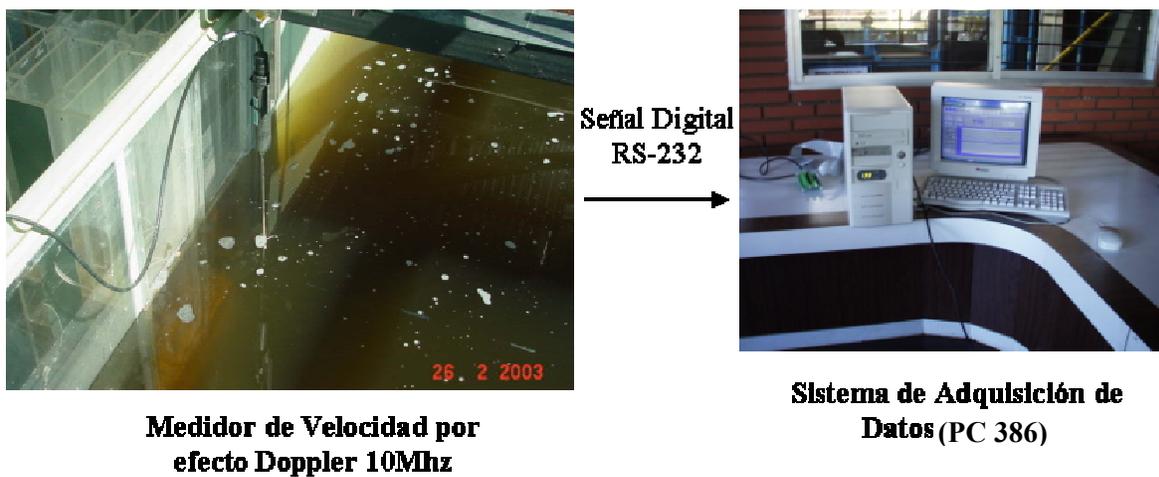


FIGURA 3.10.- Esquema de medición de velocidades



FIGURA 3.11.- Esquema de medición de presiones piezométricas

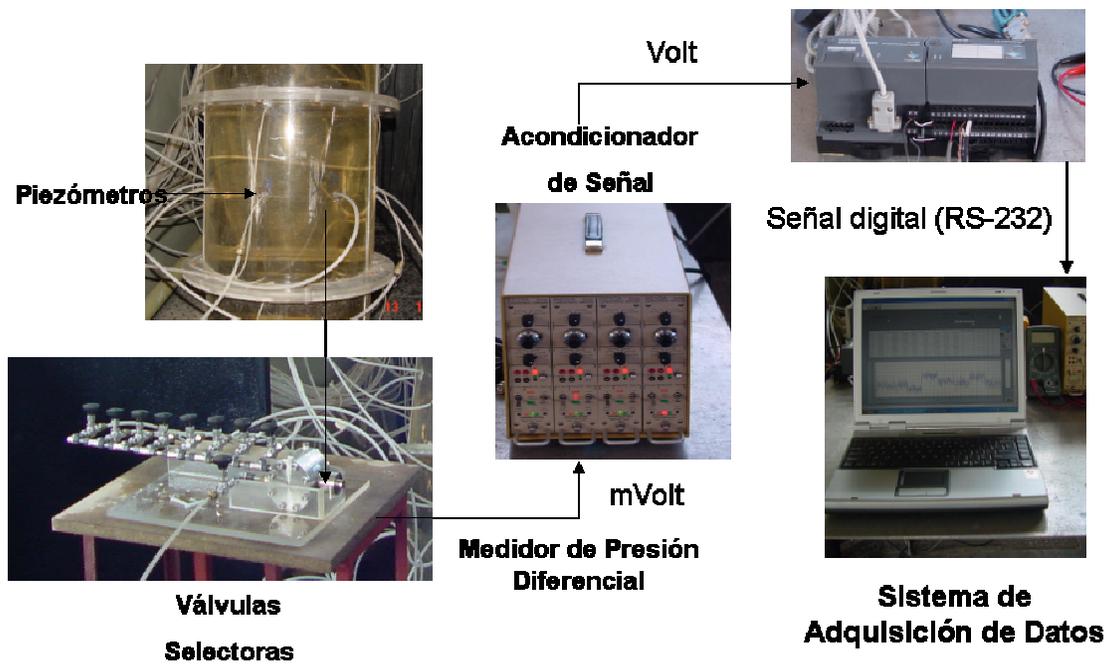


FIGURA 3.12.- Esquema de medición de presión diferencial

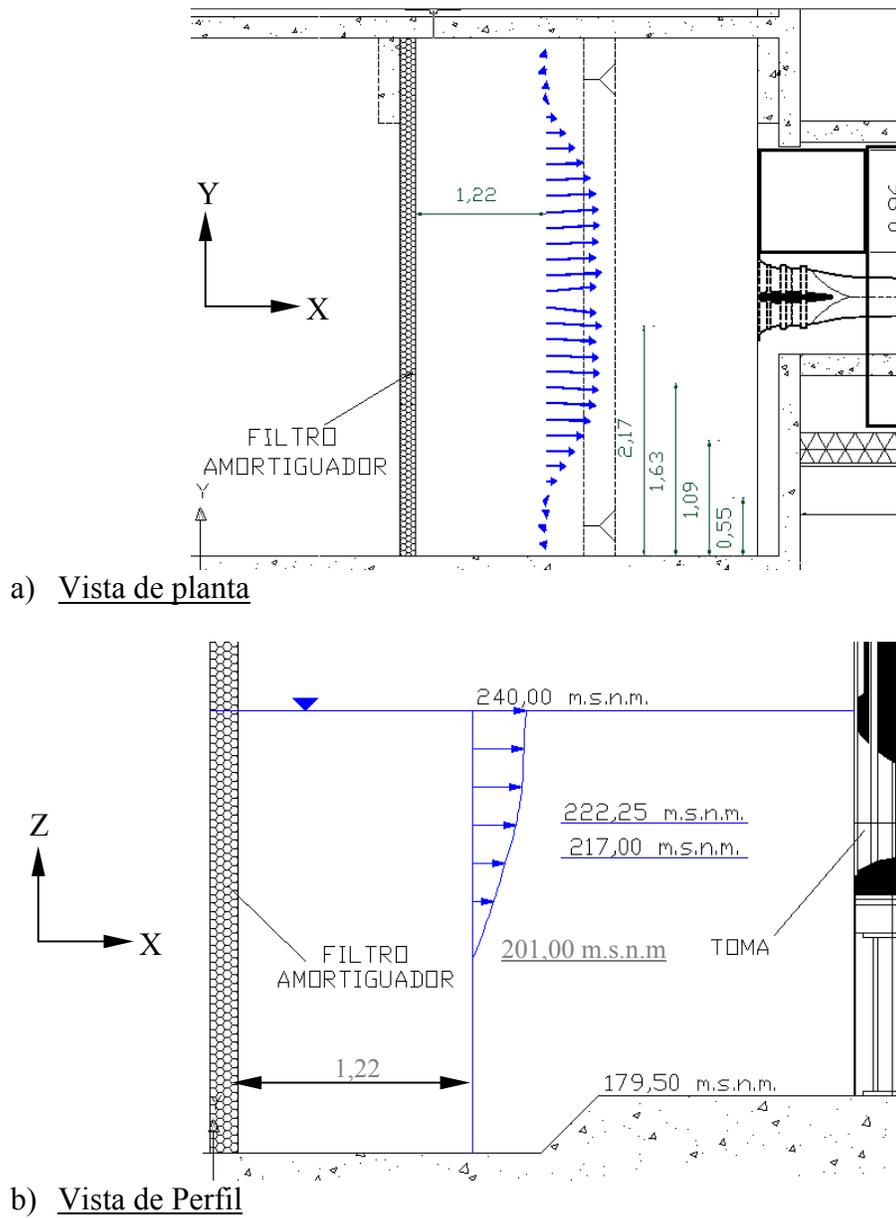


FIGURA 3.13.- Distribución de velocidades en la superficie a 1,22 m del filtro

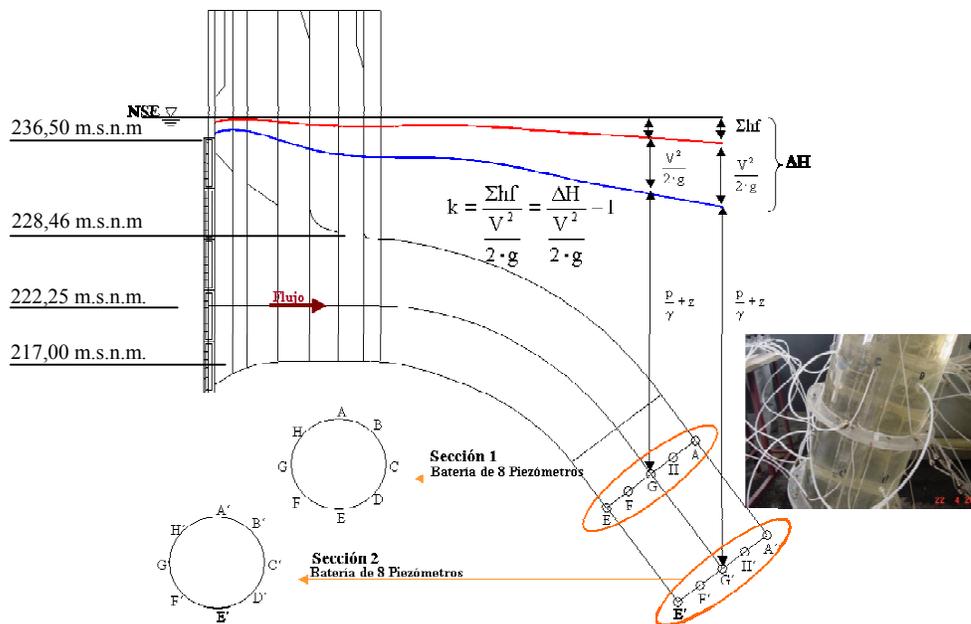


FIGURA 3.14.- Esquema teórico de la línea de energía piezométrica

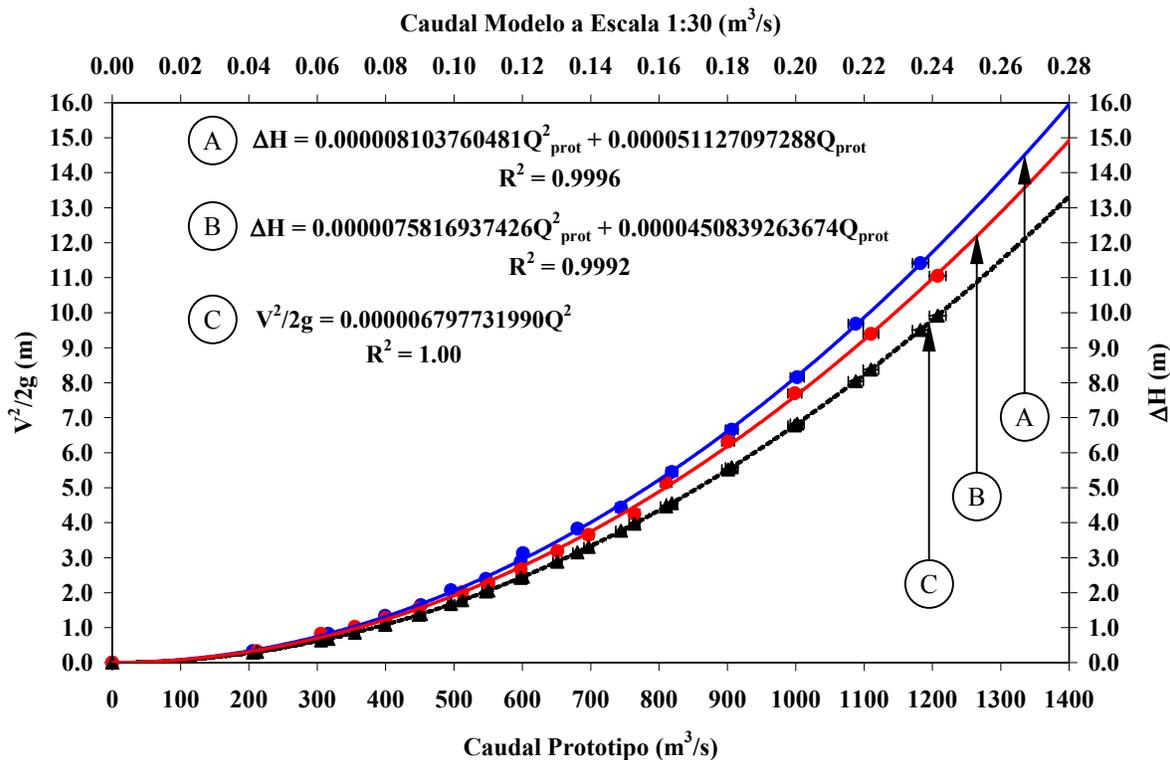


FIGURA 3.15.- Pérdida de energía en la reja contra basura

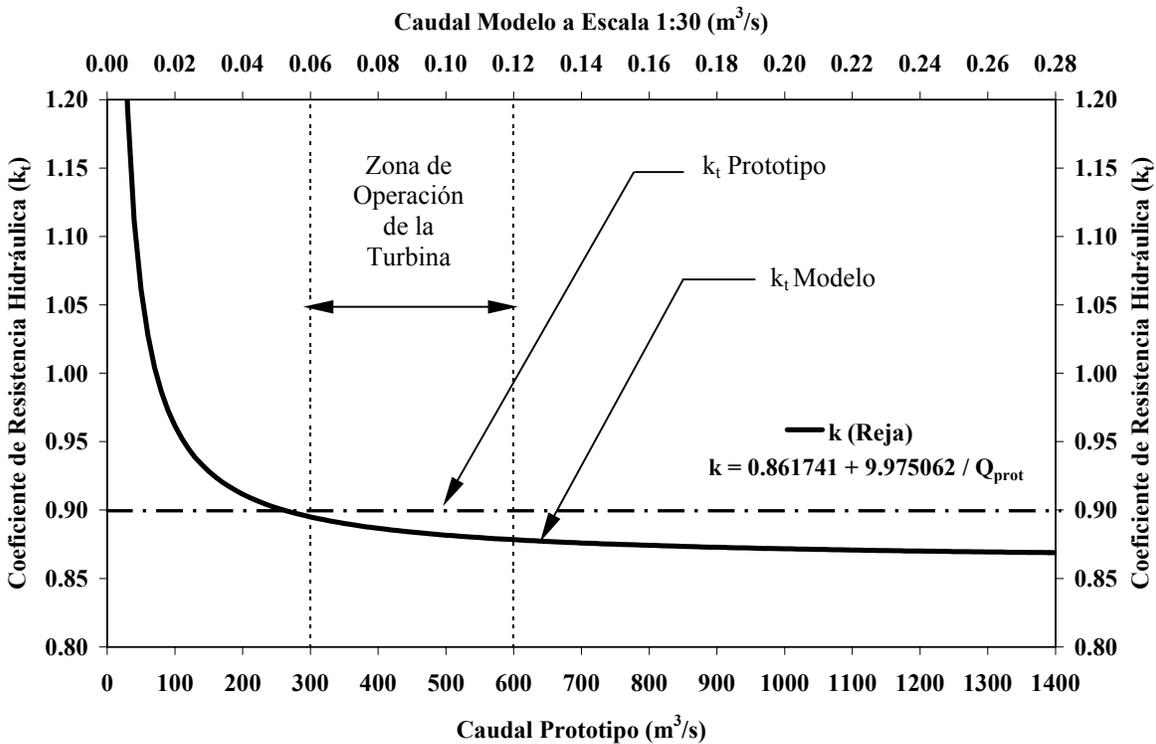
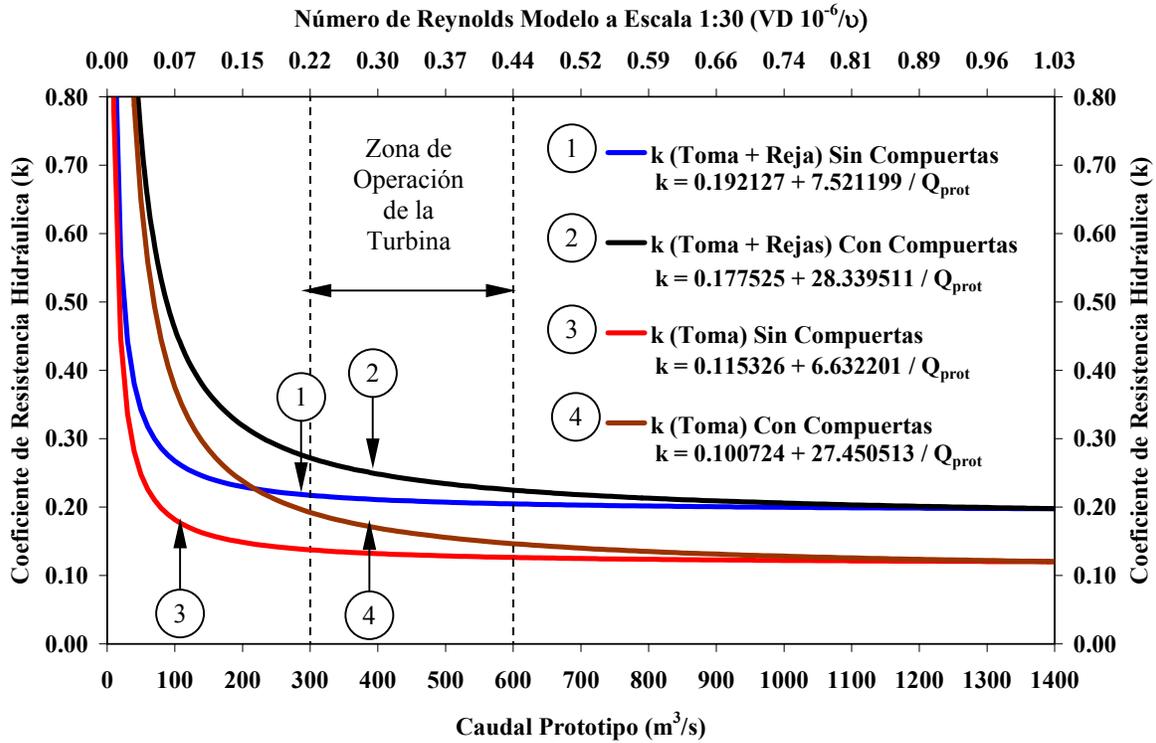




FIGURA 3.18.- Remolino superficial en toma 11 (mayo 2003)

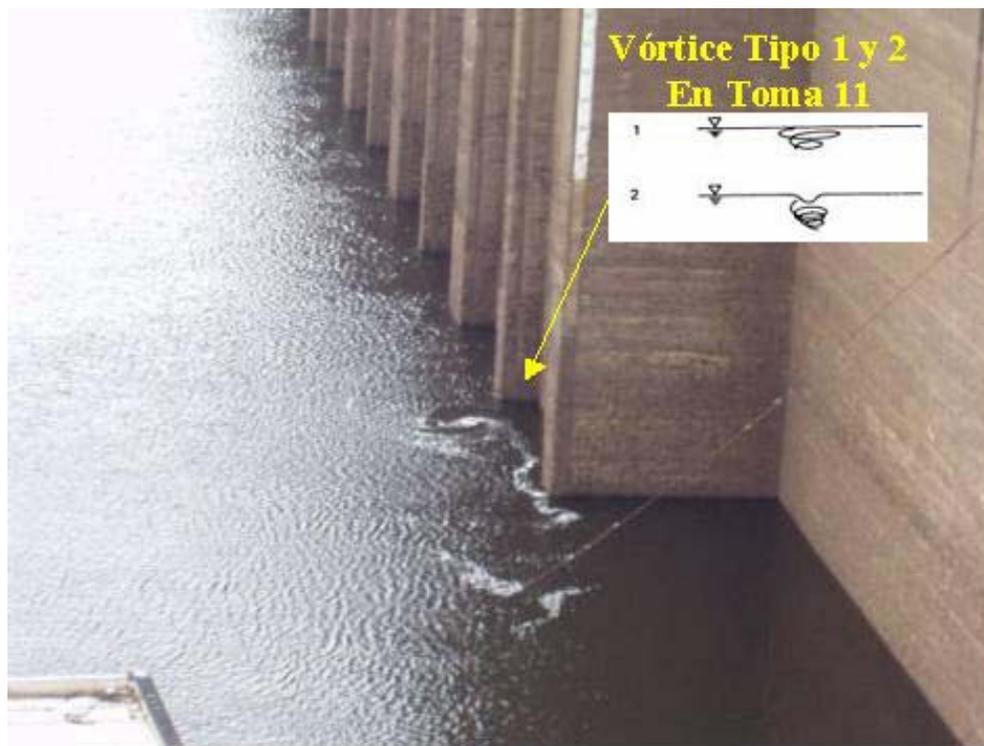


FIGURA 3.19.- Remolino y depresión superficial en la toma 11 (abril 2003)

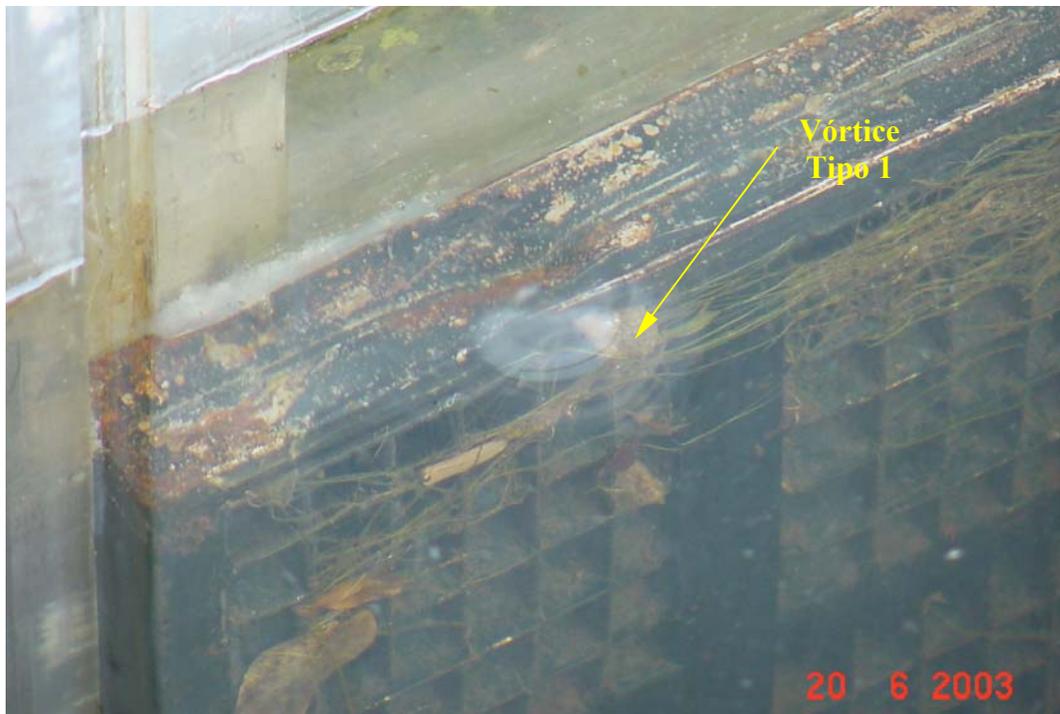


FIGURA 3.20.- Correlación modelo-prototipo (observación marzo 1985)

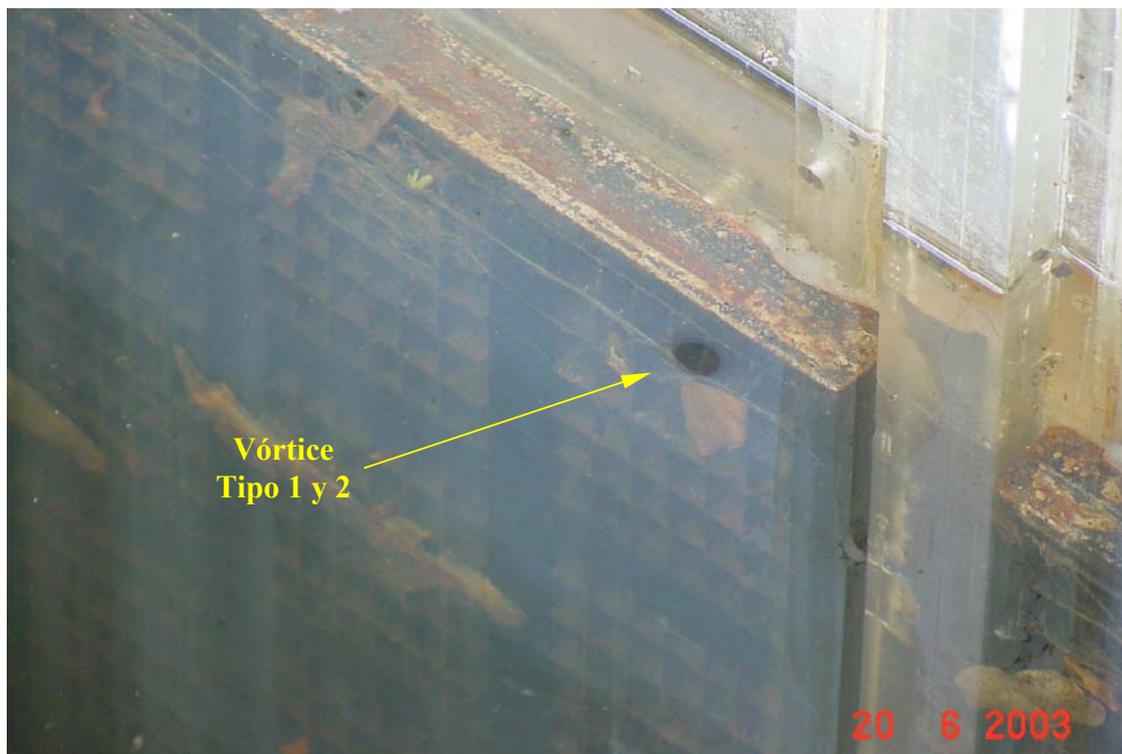


FIGURA 3.21.- Correlación modelo-prototipo (observación mayo 2003)

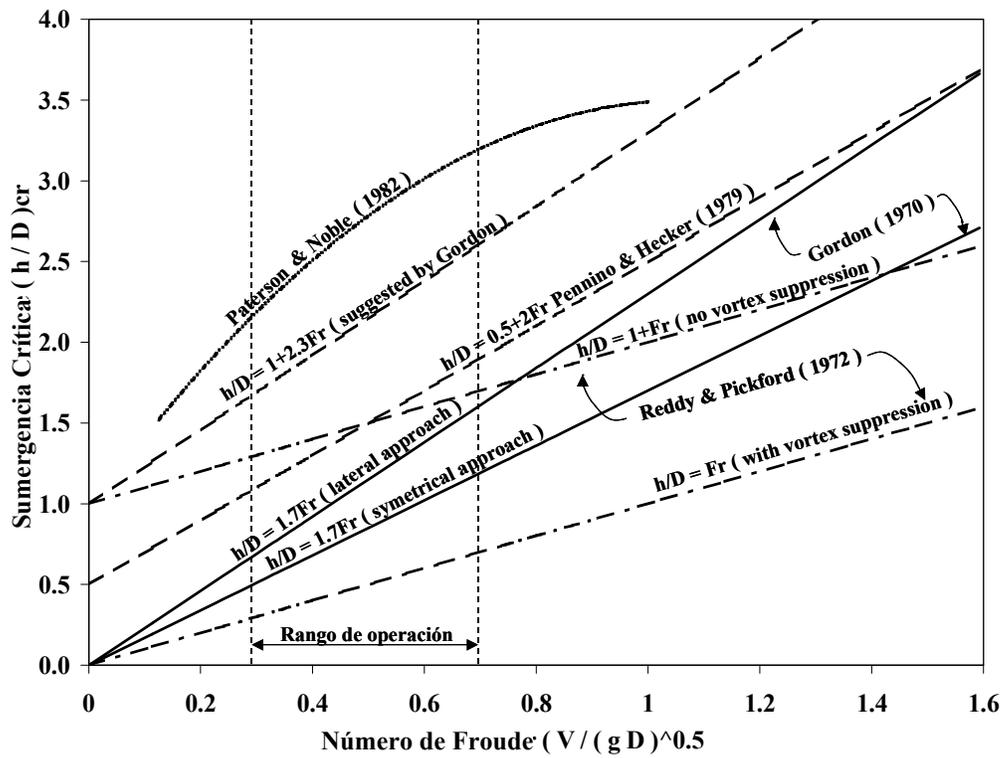


FIGURA 3.22.- Curvas guías para evitar formación de vórtices (Kanuss, 1978)

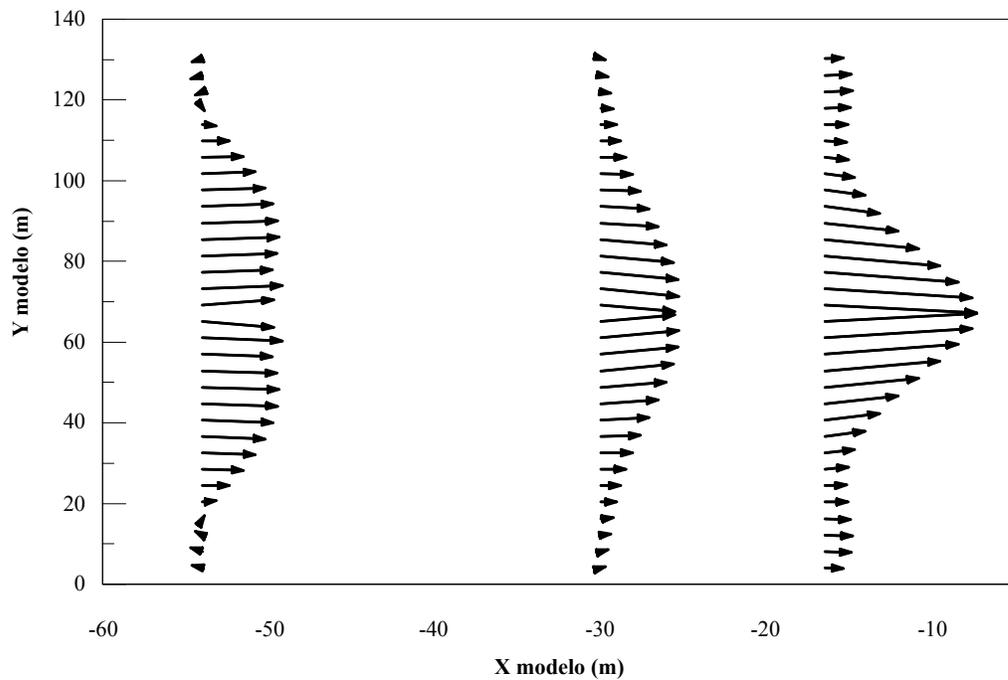


FIGURA 3.23.- Aproximación en el modelo Caso 1, $Q_{prot} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=240

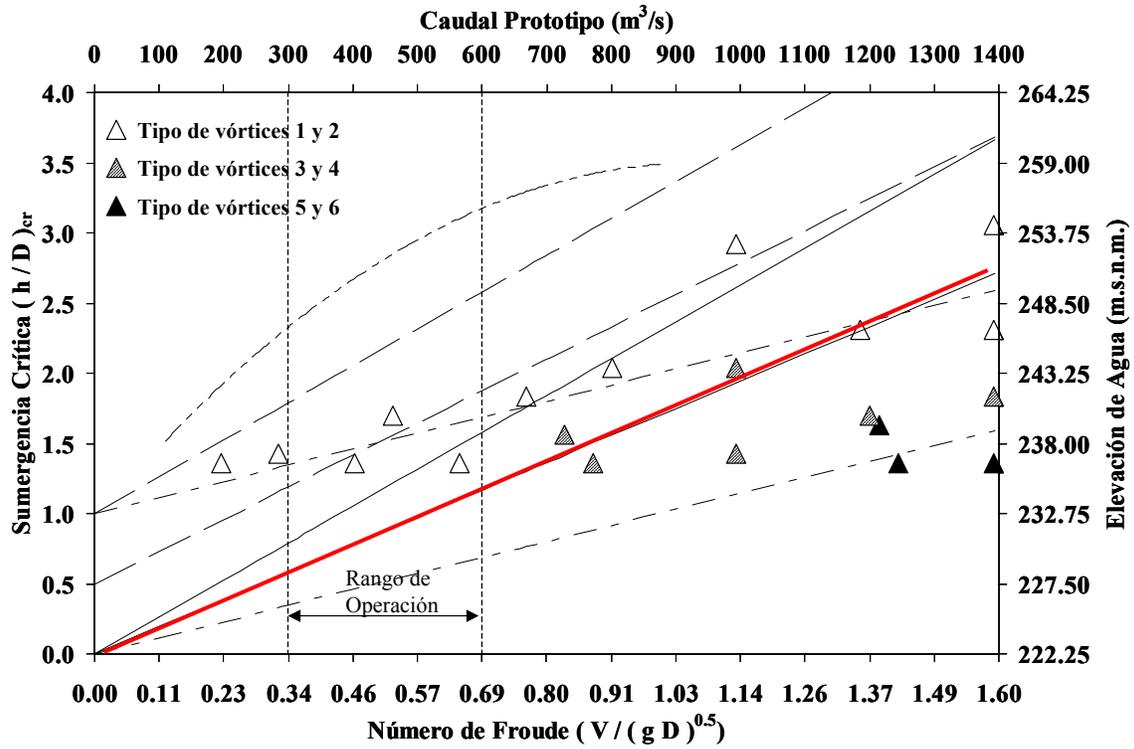


FIGURA 3.24.- Sumergencia crítica - Caso 1



FIGURA 3.25.- Caso 1, no hay vórtices, $Q_{prot}=600 m^3/s$, El.=240



FIGURA 3.26.- Caso 1, vórtices tipo 5 cuasi-permanentes , $Q_{\text{prot}}=1.400 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=237



FIGURA 3.27.- Arreglo de álabes móviles para simulación del Caso 2

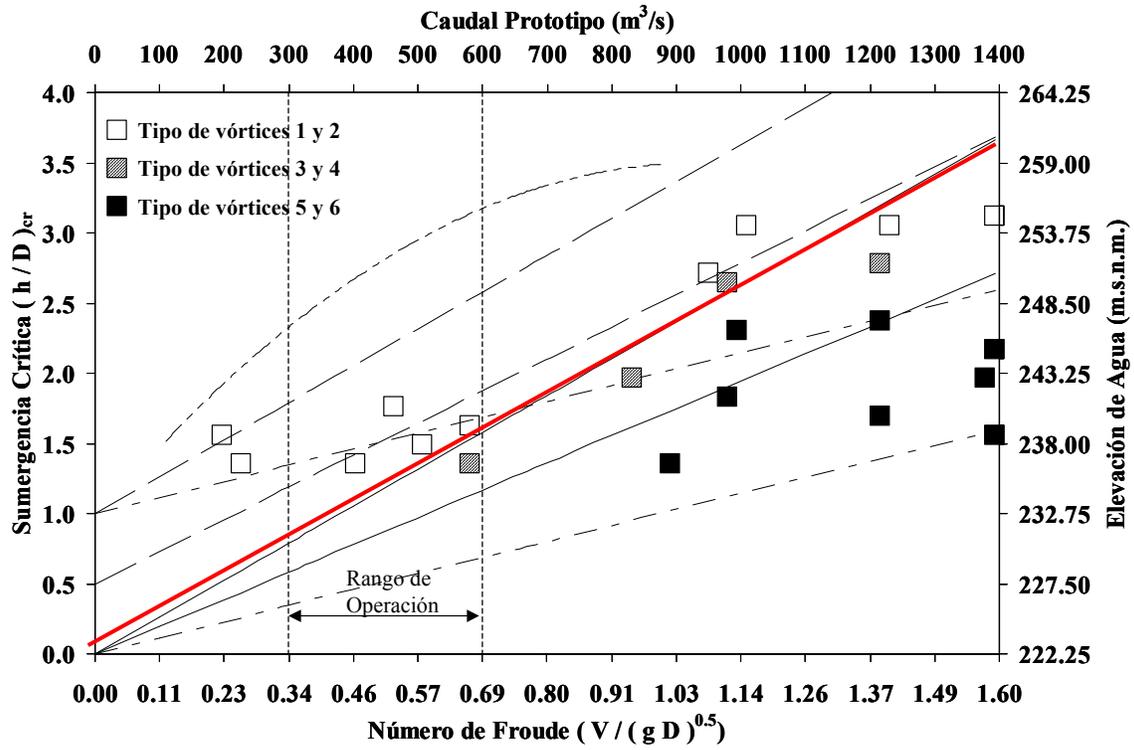


FIGURA 3.28.- Sumergencia crítica – Caso2



FIGURA 3.29.- Caso 2, vórtices tipo 6 cuasi-permanentes, $Q_{prot}=800 m^3/s$, El.=237



FIGURA 3.30.- Caso 2, vórtices tipo 5 frecuente , $Q_{\text{prot}}=1200 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=246



FIGURA 3.31.- Arreglo de álabes móviles para simulación del Caso 3

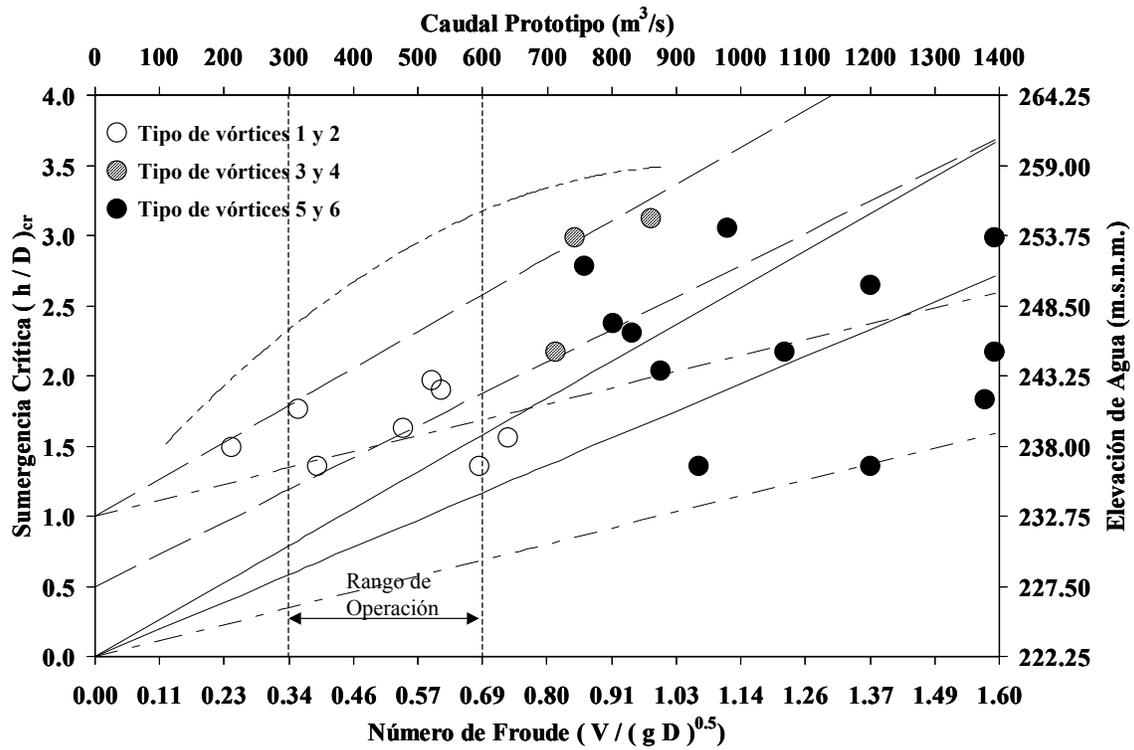


FIGURA 3.32.- Sumergencia crítica – Caso 3



FIGURA 3.33.- Caso 3, vórtice tipo 1 esporádico , $Q_{prot}=600 m^3/s$, El.=237

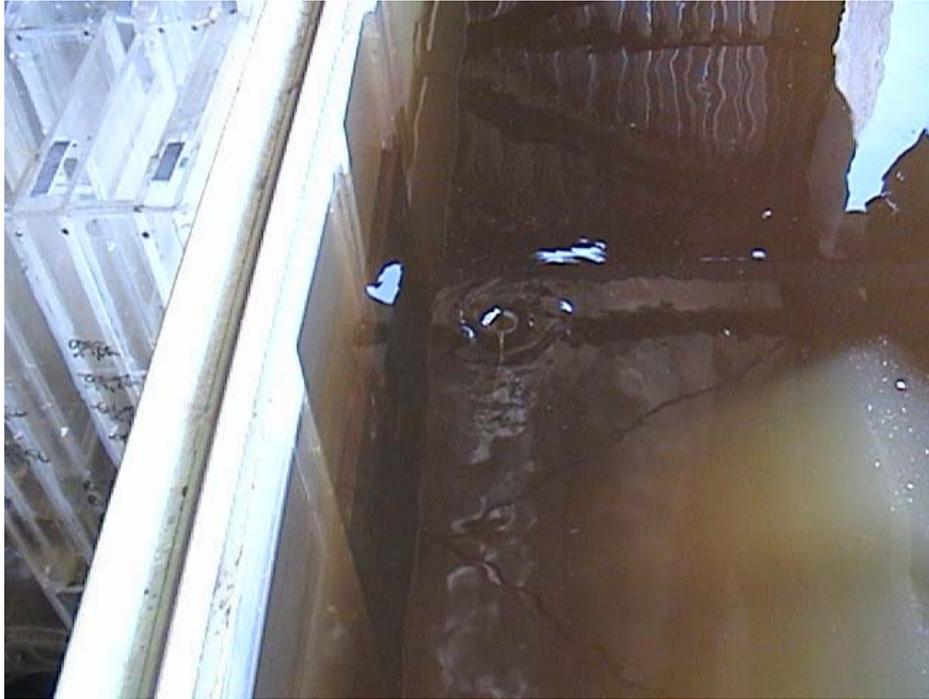


FIGURA 3.34.- Caso 3, vórtices tipo 5 frecuente , $Q_{\text{prot}}=1000 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=255



FIGURA 3.35.- Caso 3, vórtices tipo 6 permanente, $Q_{\text{prot}}=1400 \text{ m}^3/\text{s}$, El.=255,00



FIGURA 3.36.- Tren de ondas estacionarias

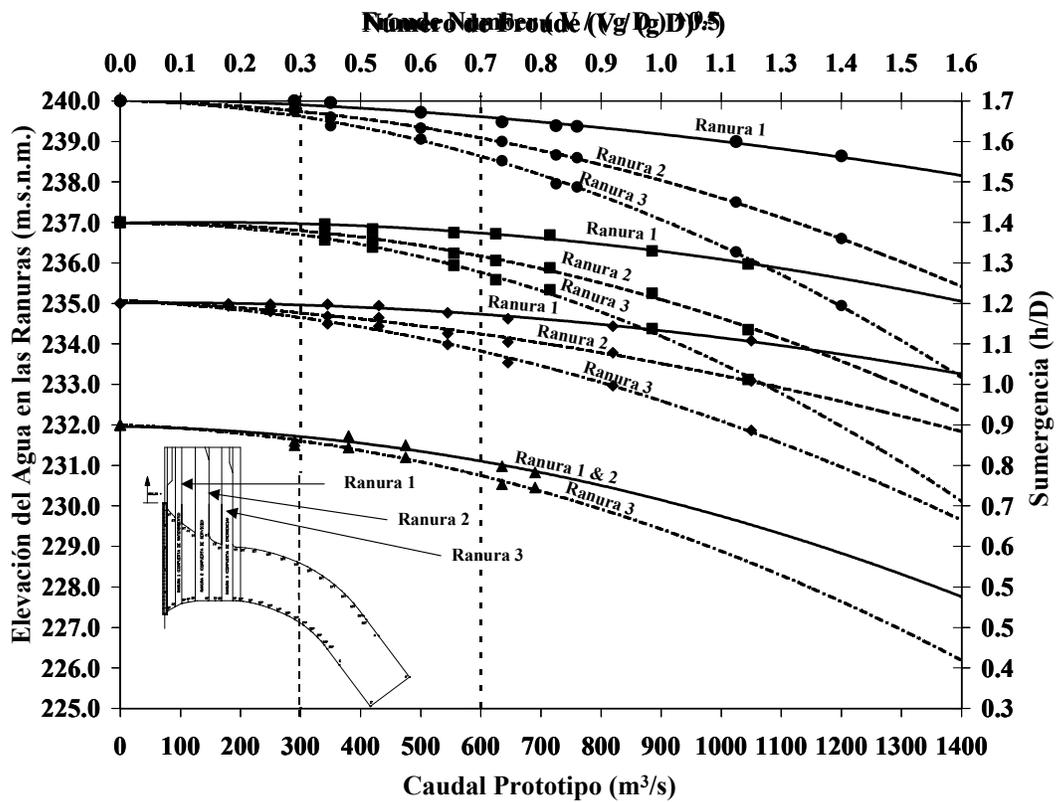


FIGURA 3.37.- Elevación del agua en las ranuras de las compuertas

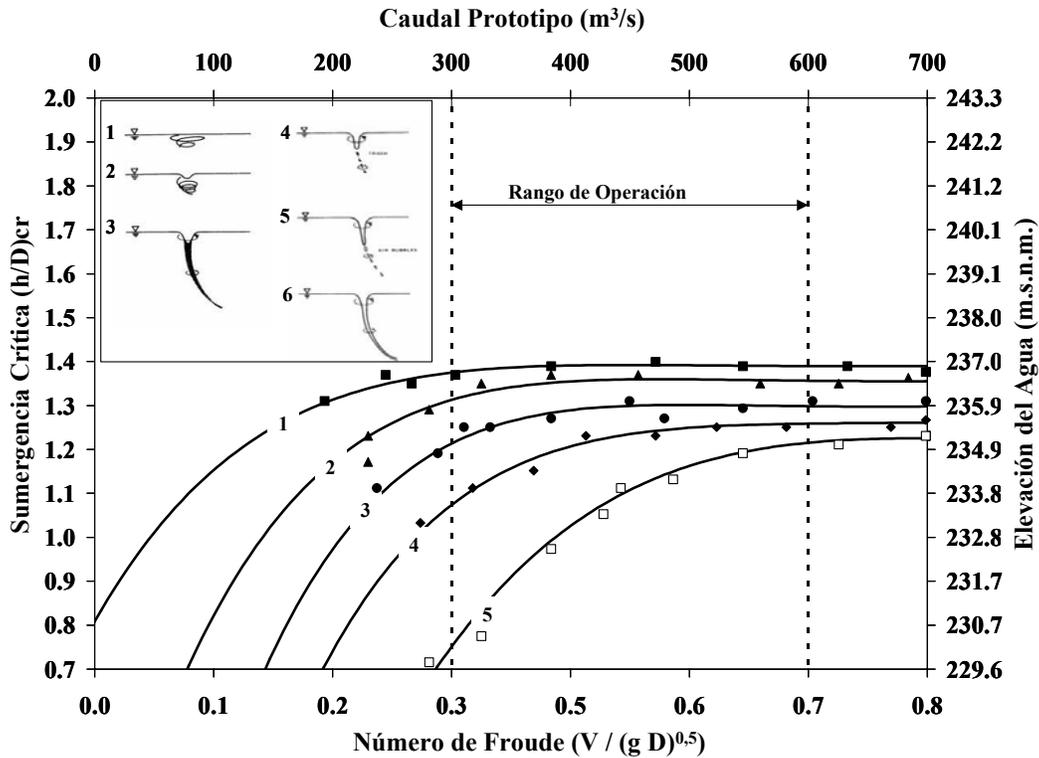


FIGURA 3.38.- Vórtices por corte en las ranuras de las compuertas

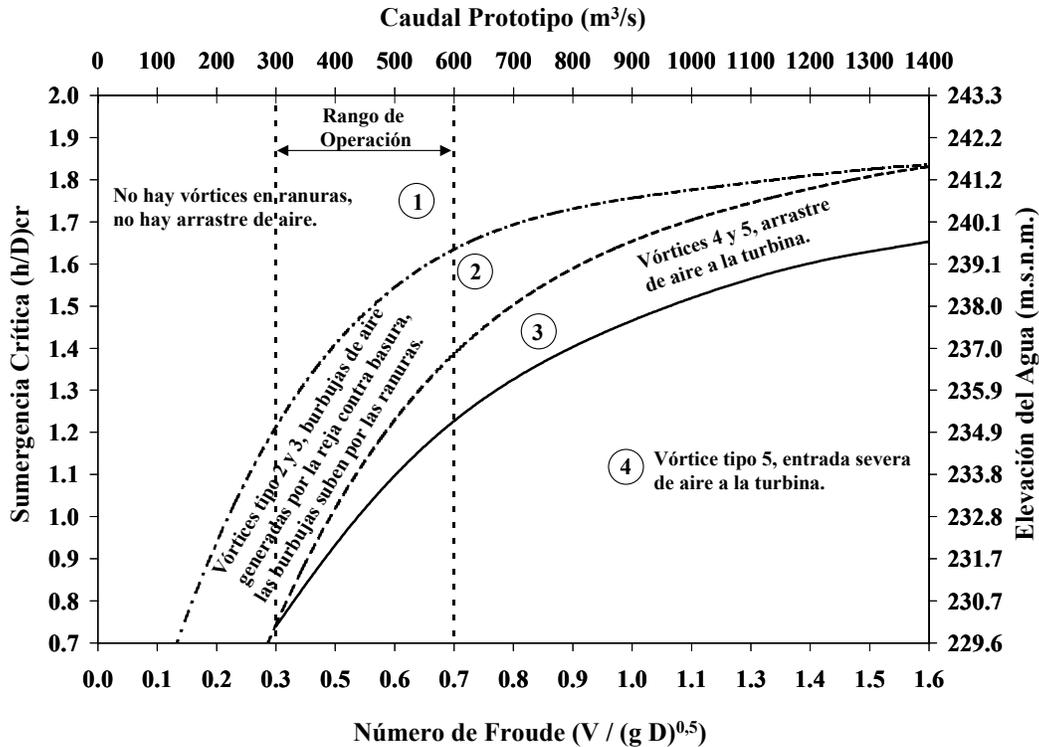


FIGURA 3.39.- Arrastre de aire

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

- El comportamiento de flujo en el embalse y la zona de aproximación es relativamente bidimensional horizontal excepto en las zonas cercanas a las tomas de las turbinas de Casa de Máquinas 1 y 2, donde las líneas de corriente adquieren un comportamiento tridimensional debido a la distorsión de las líneas de flujo en el volumen de influencia de la toma. Por ello, la utilización del modelo matemático bidimensional de elementos finitos FESWMS-2DH para representar el movimiento de la masa de agua en el embalse resultó ser una herramienta matemática efectiva que disminuye el esfuerzo computacional y es económicamente ventajosa ante la utilización de modelos tridimensionales para la determinación de las condiciones de aproximación a las máquinas.

Adicionalmente, la calibración, correlacionada por mediciones de vectores velocidades y observaciones de trazadores boyantes en el embalse de Guri, demostró que el modelo matemático representa el comportamiento hidrodinámico de las líneas de corriente que se aproximan a la Casa de Máquinas 1 y 2 de Guri aún cuando las tomas están representadas por canales rectangulares. De hecho, el modelo matemático determinó el ángulo de aproximación de las líneas de flujo a 70 m aguas arriba de las tomas de Casa de Máquinas 2 con aceptable precisión.

- La correlación modelo físico-prototipo es muy buena, debido a que el modelo simuló el comportamiento de los vórtices de superficie observados en el prototipo. Por lo tanto, se puede concluir que el modelo físico a escala 1:30 está calibrado en el volumen de influencia de las tomas.
- La colocación de álabes móviles semi-sumergidos representa una alternativa para simular los ángulos y magnitudes de las líneas de flujo en modelos físico de formación de

vórtices donde las limitaciones de espacio y el compromiso de los efectos de escala impidan representar la hidrodinámica del flujo de aproximación del prototipo.

- La independencia del coeficiente de resistencia hidráulica de la toma con respecto a la viscosidad y la investigación realizada alrededor de los criterios de modelaje de vórtices en el ámbito mundial demostraron que el modelo hidráulico a escala 1:30 no posee efectos de escala que influyan sobre la precisión de los resultados.
- Los experimentos confirmaron que el ángulo de incidencia de las líneas de flujo de aproximación a la toma afecta la intensidad y frecuencia de formación del vórtice; para aproximaciones laterales los vórtices de superficie son más fuertes para caudales exagerados, sin embargo, en el rango de operación de las turbinas los vórtices son débiles y no representan un peligro para la turbina.
- Cuando la toma trabaja parcialmente sumergida no existen vórtices de superficie; sin embargo, la interacción entre el flujo de agua y las ranuras sumergidas genera vórtices formados por el desprendimiento de las líneas de flujo en el contorno de la ranura. Para caudales exageradamente altos en el modelo, bajo el criterio de igual velocidad con el prototipo, se presenta arrastre de aire. No obstante, se considera que este criterio refleja una condición extremadamente conservadora y podría no ser apropiada su consideración a la hora de tomar decisiones.
- El modelo hidráulico a escala 1:30 está constituido por un tanque confinado y una toma; sin embargo, el prototipo está conformado por 20 tomas las cuales se encuentran trabajando bajo diferentes condiciones de operación, por lo tanto, se recomienda el estudio de la influencia tridimensional de flujos secundarios creados por el funcionamiento de tomas adyacentes (tomas vecinas) sobre los vórtices de superficie, lo cual pudiera ser desarrollado mediante la implementación de un modelo matemático tridimensional calibrado en la zona de influencia de las tomas con el prototipo.

REFERENCIAS

- Anderson, J. D. (1995), "Computational Fluid Dynamics - The Basic with Applications", University of Maryland – Department of Aerospace Engineering, McGrawHill, New York.
- Anwar, H. O. (1981), "Measurement of Non-Dimensional Parameters Governing the Onset of Free Surface Vortices. Horizontal and Vertically Inverted Intakes", Report No. IT 216, Hydraulics Research Station, Wallingford, Agosto.
- Anwar, H.O. y Ampheltt (1980), "Vortices at Vertical Inverted Intake", Journal IAHR.
- Anwar, H.O, Wéller y Ampheltt (1978), "Similarity of Free – Vortex at Horizontal Intake", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 16, No. 2.
- Barners, H. H., Jr. (1967), "Roughness Characteristics of Natural Channels", US Geological Survey Water Supply Paper 1849, 213p.
- Carrillo, L. & Wong Tang, G. (2002), "Estudio Numérico del Nivel Crítico de Turbinado en el Embalse de Guri", Trabajo de Grado – Universidad Simón Bolívar, Caracas.
- Chang, E. (1979), "Experimental Data on the Hydraulic Design of Rectangular Pump Sumps", BHRA Report RR1518, Enero.
- Chow, V. T. (1959), "Open Chanel Hydraulics", New York, McGraw-Hill, 680p.
- Currier, I.G. (1998), "Fundamental Mechanics of Fluids", Toronto.
- Daggett y Keulegan (1974), "Similitud in Free – Surface Vortex Formations", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 100, No. 11.
- Delgado, D. (2003), "Informe de Pasantía Realizado en el Dpto. de Hidráulica de C.V.G. EDELCA", Pasantía – Universidad Metropolitana, Caracas.

- Denny D.F. y Young (1957), “The Prevention of Vortices and Swirl at Intakes”, IAHR Congress Lissabon, Paper C1.
- Dicmas, J. L. (1978), “Effect of Intakes Structures Modifications on the Hydraulics Performance of a Mixed-Flow Pumps”, Proc. IAHR-ASME-ASCE Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, CSU Fort Collins, Junio.
- Durin, W. y Hecker (1978), “The Modeling of Vortices at Intakes Structures”, IAHR-ASME-ASCE Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, CSU Fort Collins, June 1978, vols I y III.
- Dpto. de Hidráulica, C.V.G. EDELCA (2003), “Proyecto de la Presa el Brillante – Modelo Matemático Bidimensional del canal de Aproximación del Aliviadero Principal”, Macagua, junio.
- Environmental Modeling System, Inc. (2004) , “Tutorial Manual – SMS Surface Water Modeling System”, Octava Edición, Utah.
- Ettema, R. (2000), “Hydraulic Modeling Concepts and Practice”, ASCE, Virginia.
- Farrell, C. y A. R. Cuomo (1981), “Introduction to the Study of Vortex Dynamics and Similitud in Free Surface Flows”, Centro Tecnológico de Hidráulica, Sao Paulo, Brasil.
- Fattah, A.S. (2003), “Intake Design Under Aspect of Vortex Formation”, Egypt Hydraulic Research Institute.
- Fernández, F., Méndez J. (1991), “Estudio de la Formación de Vórtices en al Aliviadero del Proyecto Caruachi”, Tesis de Grado, Universidad Católica Andrés Bello, Octubre.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., y Brooks, N., H. (1979), “Mixing in Inland and Coastal Waters”, New York, Academic Press, 438p.
- Galloway, K.D. (1982), “Reynolds Number Scale Effects When Modeling Pump Intakes Vortices”, Tesis de Maestría, Universidad Estatal de Utah, Logan.
- Gordon, J. L. (1970), “Vortices at Intakes”, Water Power.

- Gulliver, J. S., A Rindels y K. C. Lindblom (1983), "Guidelines for Intakes Design without Free Surface Vortices", Waterpower 83, Proc. Interm. Conf. Hydropower, Knoxville.
- Harza Engineering Company (1975), "Mechanical Design Memorando", Febrero.
- Hecker, G. E., 1981, "Model-Prototipe Comparison of Free Surface Vortices", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 107, No10.
- Incropera, F. P. (1996), "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", Jhon Wiley and Sons, Cuarta Edición.
- Inropera F. P., DeWitt D. P. (1996), "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th edición, Wiley, pp4220-421.
- Institute of Computer Science (2004), "Galerkin's Method", <http://www.cs.ut.ee>.
- International Institute for Land Reclamation and Improvement / ILRI, 1976, "Discharge Measurement Strutures", Publicación 20, Holanda.
- Jain, A.K., Ranga Raju y Garde (1978), "Vortex Formation at Vertical Pipe Intakes", ASCE, Journal of Hydraulic Divsion 104, HY10.
- Kenn, M. J & K. J. Zanker (1976), "Aspects of Similarity for Air-entraining Water Flows", nature 213(5071).
- Knuss, J. (1987), "Swirling Flow Problems at Intakes", Hydraulic Strutures Design Manual, IAHR.
- Krivchenko, G. I. (1986), "Hydraulic Machines Turbines and Pumps", Primera publicación, Moscow.
- Levin, A. (1967), "Problemas de Pérdidas de Carga y Estabilidad en Rejillas", Publicado en La Houille Blanche N°3, pp. 271 – 278.
- Lindblom, K.L. (1987), "Hydraulic Modeling Techniques for Intake Vortices", Tesis de Maestría Universidad de Minnesota, Marzo.
- Lindsey, S. (1983), "Theeffects of Geometry in Vortex Modelling", Thesis, Utah State University, Logan, Utah.

- Mayrhofer R.V., Tozzi y Ota (1992), “Criterios de Predicción de Vórtices en Tomas de Agua-Análisis Comparativo”, XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Colombia.
- Martins, R. (1983), “Vórtices en Estructuras Hidráulicas”, Ministerio da Habitacao, Obras Publicas e Transporte – Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Memoria N°594, Lisboa.
- Mataix, C. (1975), “Turbinas Hidráulicas”, Madrid.
- Padmanabhan y Hecker (1984), “Scale Effects in Pump Sump Models”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11.
- RD Instruments (2003), “RDI User’s Guide”, Mayo.
- Reddy, Y.R. y Pickford (1974), ”Vortex Supression in Stilling Pond Overflow”, ASCE, J. Hydraul. Div. HY11.
- Rouse, H. (1951), “Hidráulica – Mecánica Elemental de los Fluidos”, pp 99 – 89, Madrid.
- Sampieri, R., Fernández, C. & Bautista, P. (1991), “Metodología de la Investigación”, Ciudad de México.
- Semenkov, V. (2003), “Informe sobre las Actividades del Dpto. de Hidráulica”, C.V.G. EDELCA – Dpto. de Hidráulica, Macagua, Julio.
- Simmler H., Kresnik, E. (1986), “Scale Model tests for Austrá’s Kuhtai Pumped – Storege Plant”, Water Power and Dam, Febrero.
- Solana, P. (1980), “Mecánica Experimental de los Fluidos y los Modelos Hidráulicos”, Instituto de Mecánica de los Fluidos – Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- SonTek (2003), “SonTek ADV Acoustic Doppler Velocimeter – Techinal Documentation”, San Diego.
- United State Department of the Interior Bureau of Reclamation (1974), “Design of Small Dams”, 2da edición, A Water Resources Technical Publication , pp472-474.

US Department of Transportation – Manual (2002), “Finite Element Surface-Water Modeling System: Two-Dimensional Flow in a Horizontal Plane”, Tercera Edición, Virginia.

Vergara, M. A. (1999), “Técnicas de Modelación en Hidráulica”, Alfaomega, Ciudad de México.

Wei, C.Y. & Boknecht J. (1991), “A Rocky Mountain Project Intake / Discharge Channel Flow Simulation Study”, WaterPower, Denver.

Yalim, M. (1971), “Theory of Hydraulic Models”, Canada, MacMillan.

APÉNDICE 1

APÉNDICE 2

APÉNDICE 3

APÉNDICE 4

APÉNDICE 5
