

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN  
ENTRE LAS CENTRALES MOLINO Y SOPLADORA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**VERÓNICA PILAR RÍOS BRIONES**

[veronica\\_rios.b@hotmail.com](mailto:veronica_rios.b@hotmail.com)

**DAVID ISRAEL CRUZ CHICAIZA**

[poyas7711@hotmail.com](mailto:poyas7711@hotmail.com)

**DIRECTOR: ING. HÉCTOR FUEL, M.Sc.**

[hector.fuel@epn.edu.ec](mailto:hector.fuel@epn.edu.ec)

**Quito, Febrero 2010**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Verónica Pilar Ríos Briones y David Israel Cruz Chicaiza, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Verónica Ríos B.

---

David Cruz Ch.

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por David Israel Cruz Chicaiza y Verónica Pilar Ríos Briones, bajo mi supervisión.

---

**Ing. Héctor Fuel**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Doy gracias a Dios por ser mi guía, mi proveedor, mi soporte y mi consuelo. Gracias Señor por todas las pruebas que aunque difíciles, formaron mi carácter y fortalecieron mi espíritu. Gracias también por haber puesto en mi camino a todas aquellas personas que han sido mi ayuda, mi compañía, y que han contribuido en mi formación.

Un especial agradecimiento a mi familia. A mi padre que en vida hizo siempre lo posible por brindarme la mejor educación; gracias por haberme enseñado a luchar por alcanzar mis metas y por inculcarme valores de vida. A mi madre por su valentía al convertirse en padre y madre para sus hijas, por no dejarnos caer ante las adversidades y por apoyarme en mis decisiones. A mis hermanas Karina y Silvana por estar pendientes de mi y animarme a seguir adelante. Gracias Kari por ser una gran hermana, por creer en mí y ser mi apoyo en todo momento, sin ti no lo hubiera logrado.

A David, mi compañero, por ser la persona junto a la cual realicé el presente proyecto de titulación y con la que he compartido la mayor parte del tiempo en el que se llevó a cabo el proyecto. Gracias por estar a mi lado en los buenos y malos momentos, porque a pesar de los problemas y las disputas, te mantuviste a mi lado. Gracias también por tu compañía y porque junto a ti aprendo a ser mejor persona cada día.

Agradezco además a los profesores de la de carrera de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional que contribuyeron a mi formación profesional. Un sincero agradecimiento al Doc. Ing. Marco Castro por ser ejemplo, guía y amigo. Al personal del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, gracias por brindarme la oportunidad de colaborar con ustedes como ayudante de laboratorio de Hidráulica. En este tiempo tuve la oportunidad de aprender mucho de la mano de grandes profesionales, y vivir gratas experiencias.

Como olvidar a mis compañeros de trabajo que aportaron al desarrollo de este proyecto. Gracias Nathy porque supiste ser una buena maestra y me enseñaste a perder el miedo a dar clases en el laboratorio, y por estar presta a colaborar en lo que necesitara. Gracias Beto por ser siempre tan espontáneo y traer a la oficina un ambiente más ligero y divertido. Gracias también al personal del taller, Santiaguito, Manuelito, Marcelito y Waly que colaboraron en la realización del modelo y que supieron ganarse mi aprecio por ser excelentes trabajadores y más que eso buenos camaradas.

A mis buenos amigos de la facultad, José, Geovanna, Mauricio, David, Jessica, Luis y Juanito, con los que viví inolvidables momentos. Gracias por estar conmigo en las buenas y en las malas. Sin ustedes estudiar en la poli no hubiera sido lo mismo.

A mis amigas de toda una vida, Vale, Gaby, Pauly y a mi prima Cinthya, por ser siempre un apoyo. Sé que siempre podré contar con ustedes. Son las mejores.

En general quisiera agradecer a todas las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis, con sus altos y bajos y a todas esas personas que creyeron en mí. Desde lo más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

Por último agradezco a todos quienes han quedado en los sitios más escondidos de mi memoria, pero que fueron partícipes en cincelar a la persona que soy.

**Verónica Ríos Briones**

## **AGRADECIMIENTO**

En mi preparación profesional hubo personas que desinteresadamente compartieron su saber, su hacer, su actuar día a día. A todos ellos, mis Maestros y mis Asesores, extiendo mi profundo agradecimiento. Sus esfuerzos no serán inútiles, sino al contrario serán multiplicados y llevados en alto en mi buen obrar en la vida profesional.

**David Cruz C**

## **DEDICATORIA**

A mi padre que sé estaría orgulloso de mí, a mi madre y a mi hermana Karina, con mucho amor les dedico todo mi esfuerzo y trabajo puesto en la realización de este proyecto de titulación.

**Verónica Ríos Briones**

## **DEDICATORIA**

Todo lo que soy es gracias al inmenso amor de Dios, de mis padres y de mi hermana. Ellos animaron mi vida personal y estudiantil, por ello con amor les dedico esta tesis, fruto y conjugación de mi esfuerzo, trabajo afanoso, responsabilidad permanente, que me inculcaron cada día.

**David Cruz C.**

## CONTENIDO

<b>DECLARACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>IV</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>VI</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VII</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VIII</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE ANEXOS TABLAS Y GRÁFICOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE ANEXOS FOTOGRAFÍCOS</b> .....	<b>XXI</b>
<b>ÍNDICE ANEXOS CÁLCULOS</b> .....	<b>XXIV</b>
<b>ÍNDICE ANEXOS CORRIDAS HEC-RAS</b> .....	<b>XXIV</b>
<b>ÍNDICE ANEXOS PLANOS</b> .....	<b>XXIV</b>
<b>SIMBOLOGÍA</b> .....	<b>XXV</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XXVII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XXVIII</b>
<b>PRESENTACIÓN</b> .....	<b>XXIX</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL APROVECHAMIENTO HIDRO ELÉCTRICO SOPLADORA .....	2
1.3 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN Y DEL ESQUEMA DE FLUJO A LO LARGO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES .....	4
1.4 REQUERIMIENTOS DE LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DEL FENÓMENO DE FLUJO A TRAVÉS DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN ..	6
1.5 OBJETIVOS, ALCANCE Y LIMITACIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN .....	7
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
<b>GENERALIDADES SOBRE LA MODELACIÓN FÍSICA</b> .....	<b>10</b>

2.1	METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DE UN FENÓMENO DE FLUJO A SUPERFICIE LIBRE. TIPOS DE MODELOS .....	10
2.1.1	TIPOS DE MODELOS .....	11
2.2	BASES Y RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y PRUEBAS CON UN MODELO DE FONDO FIJO, BAJO EL CRITERIO DE SIMILITUD DE FROUDE Y SEMEJANZA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO .....	12
2.2.1	SIMILITUD DE FROUDE .....	13
2.2.2	SEMEJANZA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO.....	15
2.3	RELACIÓN DE ESCALAS ENTRE LAS MAGNITUDES HIDRODINÁMICAS DE UN MODELO CON SIMILITUD DE FROUDE Y SU PROTOTIPO .....	18
2.4	CONSIDERACIONES SOBRE LA TRANSPOSICIÓN DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS OBTENIDAS EN EL MODELO: NIVELES O PROFUNDIDADES DE AGUA, VELOCIDADES, PRESIONES Y PATRONES DE FLUJO .....	19
2.5	CONCLUSIONES .....	20
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>.....</b>	<b>21</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN</b>	<b>.....</b>	<b>21</b>
3.1	SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DE LONGITUDES. ESCALAS DERIVADAS.....	21
3.2	ESTRUCTURAS PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS DEL MODELO FÍSICO.....	22
3.2.1	ESTRUCTURAS CONSTITUTIVAS DEL MODELO .....	23
3.2.2	GENERALIDADES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA.....	25
3.3	IMPLANTACIÓN DEL MODELO Y DE LAS ESTRUCTURAS COMPLEMENTARIAS.....	28
3.3.1	REVISIÓN DEL ÁREA Y ALTURA DISPONIBLE EN LABORATORIO .....	28
3.3.2	SELECCIÓN DEL SITIO DE IMPLANTACIÓN DEL MODELO.....	28

3.3.3 REPLANTEO .....	29
3.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN BÁSICA...	30
3.4.1 MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN .....	30
3.4.2 INSTRUMENTACIÓN E EQUIPAMIENTO .....	31
3.5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO.....	34
3.5.1 NIVELACIÓN DEL MODELO.....	34
3.5.2 CONSTRUCCIÓN DE TANQUES DE ALIMENTACIÓN, TANQUES DE ENTRADA AL MODELO Y ARMADO DE TUBERÍAS .....	34
3.5.3 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE.....	35
3.5.4 CONSTRUCCIÓN DE CANALES DE CIRCULACIÓN DEL FLUJO Y ESTRUCTURAS EN ACRÍLICO .....	37
3.5.5 CONSTRUCCIÓN DE CANALES DE RESTITUCIÓN .....	39
3.5.6 CONSTRUCCIÓN DE VERTEDEROS Y ESTRUCTURAS EN MADERA.....	39
3.6 CONCLUSIONES .....	40
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>42</b>
<b>CALIBRACIÓN DEL MODELO .....</b>	<b>42</b>
4.1 BASES PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO CON FLUJO VARIADO PERMANENTE.....	42
4.2 PLAN DEFINITIVO DE PRUEBAS DE CALIBRACIÓN .....	43
4.2.1 CALIBRACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE CONTROL DE CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA AL MODELO.....	43
4.2.1.2.1 CALIBRACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE DESCARGA DE LAS FASES AB Y C .....	44
4.2.1.2.2 CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO DE LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN.....	44
4.2.1.2.3 CALIBRACIÓN DEL VERTEDERO DE DESCARGA INTERMEDIA	45
4.2.2 CALIBRACIÓN DE CALADOS MODELO - PROTOTIPO .....	45
4.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS DE CALIBRACIÓN Y/O DE VALIDACIÓN DEL MODELO FÍSICO .....	45

4.4	PRESENTACIÓN BÁSICA DE LOS RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	46
4.4.1	VERTEDEROS DE CONTROL DE CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA AL MODELO .....	46
4.4.2	COMPARACIÓN CALADOS MODELO - PROTOTIPO .....	53
	<i>FASE AB</i> .....	54
	<i>FASE C</i> .....	56
4.5	CONCLUSIONES.....	59
	<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>60</b>
	<b>ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL .....</b>	<b>60</b>
5.1	OBJETIVOS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL.....	60
5.2	PLAN DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL .....	60
5.2.1	DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS A SER REPRESENTADOS.....	62
5.3	ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO.....	65
5.3.1	CASO 1.....	65
5.3.2	CASO 2.....	69
5.3.3	CASO 3.....	70
5.3.4	CASO 4.....	70
5.4	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL CON EL DISEÑO ORIGINAL DE LAS OBRAS.....	71
5.4.1	CAUDALES BAJOS.....	71
5.4.2	CAUDALES MEDIOS.....	72
5.4.3	CAUDALES ALTOS .....	73
5.6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE VARIANTES.....	78
	CONCLUSIONES: .....	78
	RECOMENDACIONES:.....	80
	<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>81</b>
	<b>ESTUDIO DE VARIANTES.....</b>	<b>81</b>
6.1	PLAN DE PRUEBAS CON LAS VARIANTES SELECCIONADAS .....	81

6.1.1	UMBRALES DE FONDO EN LA ENTRADA A LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN .....	82
6.1.2	CAMBIO DE LA TRANSICIÓN GRADUAL DE LA ENTRADA A LA CÁMARA, POR LA CONTINUACIÓN DEL TÚNEL DE INTERCONEXIÓN HASTA EL INICIO DE LA CÁMARA. ....	83
6.1.3	CLAPETAS EN LOS VERTEDEROS DE DESCARGA DE LA FASE AB, FASE C Y DESCARGA INTERMEDIA.....	84
6.2	ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS CON LAS VARIANTES EN EL MODELO.....	86
6.2.1	UMBRALES DE FONDO EN LA ENTRADA A LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN .....	86
6.2.2	CAMBIO DE LA TRANSICIÓN GRADUAL DE LA ENTRADA A LA CÁMARA, POR LA CONTINUACIÓN DEL TÚNEL DE INTERCONEXIÓN HASTA EL INICIO DE LA CÁMARA .....	87
6.2.3	CLAPETAS EN LOS VERTEDEROS DE DESCARGA DE LA FASE AB, FASE C Y DESCARGA INTERMEDIA.....	88
6.3	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE VARIANTES.....	89
6.3.1	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON UMBRALES DE FONDO....	89
6.3.2	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL CAMBIO DE LA TRANSICIÓN GRADUAL DE LA ENTRADA A LA CÁMARA, POR LA CONTINUACIÓN DEL TÚNEL DE INTERCONEXIÓN HASTA EL INICIO DE LA CÁMARA .....	92
6.3.2	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON CLAPETAS EN LOS VERTEDEROS DE DESCARGA .....	93
6.4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
	CONCLUSIONES: .....	96
	RECOMENDACIONES:.....	97
	<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>99</b>
	<b>SELECCIÓN DEL DISEÑO RECOMENDADO PARA LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN .....</b>	<b>99</b>

7.1	MODIFICACIONES AL DISEÑO ORIGINAL.....	99
7.2	OBSERVACIONES Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL CAMBIO DE DISEÑO HIDRÁULICO.....	100
7.3	OPTIMIZACIÓN DEL CAMBIO DE DISEÑO.....	102
7.2.1	PRUEBAS CON ROMPEOLAS .....	102
7.2.3	PRUEBAS COLOCANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO BANDEJA CON ORIFICIOS EN LOS CUENCOS DE LAS FASES AB Y C	107
7.2.4	PRUEBAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO BANDEJA CON ORIFICIOS, VARIANDO LA INCLINACION DE LA ESTRUCTURA.....	111
7.4	DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN CON EL DISEÑO DEFINITIVO.....	113
7.3	OBJETIVOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL EN SU FASE FINAL.....	114
7.4	PLAN DE PRUEBAS EN LA FASE FINAL.....	115
	<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>117</b>
	<b>ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO DEL DISEÑO RECOMENDADO ...</b>	<b>117</b>
8.1	ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES CON EL DISEÑO DEFINITIVO .	117
8.2	CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	140
	<b>CAPÍTULO 9.....</b>	<b>142</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>142</b>
9.1	CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	142
9.2	CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO FÍSICO DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN.....	143
9.3	CONCLUSIONES Y RESTRICCIONES IMPORTANTES EN LOS RESULTADOS DEL MODELO FÍSICO DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN .....	145
9.4	CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN ....	146
	<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>148</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	

## ÍNDICE ANEXOS TABLAS Y GRÁFICOS

<b>ANEXO 1.....</b>	<b>149</b>
CALIBRACIÓN VERTEDERO TRIANGULARES DE ENTRADA AL MODEL....	149
ANEXO 1.1.....	149
CALIBRACIÓN VERTEDEROS TRIANGULARES DE ENTRADA FASE AB..	149
ANEXO 1.2.....	154
CALIBRACIÓN VERTEDEROS TRIANGULARES DE ENTRADA FASE C.....	154
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>160</b>
CALIBRACIÓN VERTEDERO DESCARGA FASE AB.....	160
ANEXO 2.1.....	160
CAUDALES DE ENTRADA VERTEDEROS TRIANGULARES FASE AB.....	160
ANEXO 2.2.....	161
CAUDALES DE SALIDA VERTEDERO RECTANGULAR DE DESCARGA FASE AB.....	161
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>162</b>
CALIBRACIÓN VERTEDERO DESCARGA FASE C.....	162
ANEXO 3.1.....	162
CAUDALES DE ENTRADA VERTEDEROS TRIANGULARES FASE C.....	162
ANEXO 3.2.....	163
CAUDALES DE SALIDA VERTEDERO RECTANGULAR DE DESCARGA FASE C.....	163
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>164</b>
CALIBRACIÓN VERTEDERO CÁMARA DE INTERCONEXIÓN.....	164
ANEXO 4.1.....	164
CAUDALES DE ENTRADA VERTEDEROS TRIANGULARES.....	164
ANEXO 4.2.....	165
CAUDALES DE SALIDA VERTEDERO TRIANGULAR CÁMARA DE INTECONEXIÓN.....	165
<b>ANEXO 5.....</b>	<b>166</b>

CALIBRACIÓN VERTEDERO DESCARGA INTERMEDIA.....	166
ANEXO 5.1.....	164
CAUDALES DE ENTRADA VERTEDEROS TRIANGULARES FASE AB.....	166
ANEXO 5.2.....	168
CAUDALES DE SALIDA VERTEDERO TRIANGULAR DESCARGA INTERMEDIA.....	168
<b>ANEXO 6.....</b>	<b>169</b>
CALIBRACIÓN VERTEDERO DESCARGA MODELO FASE AB Y FASE C.....	169
ANEXO 6.1.....	169
CALIBRACIÓN VERTEDERO DESCARGA FASE AB.....	169
ANEXO 6.1.1.....	169
CAUDALES DE ENTRADA VERTEDEROS TRIANGULARES FASE AB.....	169
ANEXO 6.2.....	172
CALIBRACIÓN VERTEDERO DESCARGA FASE C.....	172
ANEXO 6.2.1.....	172
CAUDALES DE ENTRADA VERTEDEROS TRIANGULARES FASE C.....	172
<b>ANEXO 7.....</b>	<b>174</b>
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL.....	174
ANEXO 7.1.....	174
CASO 1- PRUEBA 1: $Q_{AB}=0\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=20\text{m}^3/\text{S}$ .....	174
ANEXO 7.2.....	176
CASO 1- PRUEBA 2: $Q_{AB}=40\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=20\text{m}^3/\text{s}$ .....	176
ANEXO 7.3.....	179
CASO 1- PRUEBA 3: $Q_{AB}=40\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=60\text{m}^3/\text{s}$ .....	179
ANEXO 7.4.....	182
CASO 1- PRUEBA 4: $Q_{AB}=80\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=80\text{m}^3/\text{s}$ .....	182
ANEXO 7.5.....	184
CASO 1 - PRUEBA 5: $Q_{AB}=60\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=100\text{m}^3/\text{s}$ .....	184

ANEXO 7.6.....	187
CASO 1 - PRUEBA 6: $Q_{AB}=60\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=40\text{m}^3/\text{s}$ .....	187
ANEXO 7.7.....	189
CASO 1 - PRUEBA 7: $Q_{AB}=100\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=100\text{m}^3/\text{s}$ .....	189
ANEXO 7.8.....	192
CASO 2: $Q_{AB}=50\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=100\text{m}^3/\text{s}$ .....	192
ANEXO 7.9.....	194
CASO 3: $Q_{AB}=100\text{m}^3/\text{s}$ $Q_C=100\text{m}^3/\text{s}$ .....	194
<b>ANEXO 8.....</b>	<b>197</b>
PRUEBAS DE VORTICIDAD VS SUMERGENCIA CON EL DISEÑO ORIGINAL.....	197
<b>ANEXO 9.....</b>	<b>198</b>
PRUEBAS CON LAS VARIANTES SELECCIONADAS PARA EL DISEÑO ORIGINAL.....	198
ANEXO 9.1.....	198
PRUEBAS CON UMBRALES DE FONDO Y TRANSICIÓN BRUSCA EN LA ENTRADA DE LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN.....	198
ANEXO 9.2.....	201
PRUEBAS COLOCANDO CLAPETAS EN LOS VERTEDEROS DE DESCARGA.....	201
ANEXO 9.2.1.....	201
PRUEBA N° 1 – $Q=100\text{M}^3/\text{S}$ VARIANDO EL NIVEL DE AGUA EN LA C.I.....	201
ANEXO 9.2.2.....	204
PRUEBA N° 2 – $Q=150\text{M}^3/\text{S}$ VARIANDO EL NIVEL DE AGUA EN LA C.I.....	204
ANEXO 9.2.3.....	207
PRUEBA N° 3 – $Q = 200\text{M}^3/\text{S}$ NIVEL DE AGUA EN LA C.I CONSTANTE.....	207
<b>ANEXO 10.....</b>	<b>209</b>
PRUEBAS CON CAMBIO DE DISEÑO HIDRÁULICO.....	209

<b>ANEXO 11</b> .....	<b>210</b>
PRUEBAS CON OPTIMIZACIÓN DEL CAMBIO DE DISEÑO.....	210
ANEXO 11.1.....	210
PRUEBAS COLOCANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO BANDEJA CON ORIFICIOS EN LOS CUENCOS DE LAS FASES AB Y C – ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DEL DIÁMETRO DEL ORIFICIO.....	210
ANEXO 11.1.1.....	210
DIÁMETRO DE LOS ORIFICIOS 4CM MODELO.....	210
ANEXO 11.1.2.....	211
DIÁMETRO DE LOS ORIFICIOS 5CM MODELO.....	211
ANEXO 11.2.....	212
PRUEBAS COLOCANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO BANDEJA CON ORIFICIOS EN LOS CUENCOS DE LAS FASES AB Y C – ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA INCLINACION DE LA ESTRUCTURA.....	212
ANEXO 11.2.1.....	212
ALTERNATIVA 1 ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA BANDEJA 17°...	212
ANEXO 11.2.2.....	215
ALTERNATIVA 2 ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA BANDEJA 13°...	215
ANEXO 11.2.3.....	218
ALTERNATIVA 3 ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA BANDEJA 8° ..	218
<b>ANEXO 12</b> .....	<b>220</b>
ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO DEL DISEÑO DEFINITIVO.....	220
ANEXO 12.1.....	220
PRUEBA PF 1: Q AB = 20m <sup>3</sup> /s y QC = 0m <sup>3</sup> /s.....	220
ANEXO 12.1.1.....	220
PRUEBA PF1 – 1312.....	220
ANEXO 12.1.2.....	222
PRUEBA PF1 – 1315.6.....	222
ANEXO 12.2.....	224
PRUEBA PF 2: Q AB = 60M <sup>3</sup> /S Y QC = 0M <sup>3</sup> /S.....	224

ANEXO 12.2.1.....	225
PRUEBA PF2 – 1312.....	225
ANEXO 12.2.2.....	227
PRUEBA PF2 – 1315.6.....	227
ANEXO 12.3.....	229
PRUEBA PF 3: Q AB = 80M <sup>3</sup> /S Y QC = 0M <sup>3</sup> /S.....	229
ANEXO 12.3.1.....	229
PRUEBA PF3 – 1312.....	229
ANEXO 12.3.2.....	231
PRUEBA PF3 – 1315.6.....	231
ANEXO 12.4.....	233
PRUEBA PF 4: Q AB = 100M <sup>3</sup> /S Y QC = 0M <sup>3</sup> /S.....	233
ANEXO 12.4.1.....	234
PRUEBA PF4 – 1312.....	234
ANEXO 12.4.2.....	236
PRUEBA PF4 – 1315.6.....	236
ANEXO 12.5.....	238
PRUEBA PF 5: Q AB = 100M <sup>3</sup> /S Y QC = 20M <sup>3</sup> /S.....	238
ANEXO 12.5.1.....	238
PRUEBA PF5 – 1312.....	238
ANEXO 12.5.2.....	240
PRUEBA PF5 – 1315.6.....	240
ANEXO 12.6.....	242
PRUEBA PF 6: Q AB = 0M <sup>3</sup> /S Y QC = 20M <sup>3</sup> /S.....	242
ANEXO 12.6.1.....	243
PRUEBA PF6 – 1312.....	243
ANEXO 12.6.2.....	245
PRUEBA PF6 – 1315.6.....	245
ANEXO 12.7.....	247
PRUEBA PF 7: Q AB = 0M <sup>3</sup> /S Y QC = 60M <sup>3</sup> /S.....	247
ANEXO 12.7.1.....	247

PRUEBA PF7 – 1312.....	247
ANEXO 12.7.2.....	249
PRUEBA PF7 – 1315.6.....	249
ANEXO 12.8.....	251
PRUEBA PF 8: Q AB = 0M3/S Y QC = 80M3/S.....	251
ANEXO 12.8.1.....	252
PRUEBA PF8 – 1312.....	252
ANEXO 12.8.2.....	254
PRUEBA PF8 – 1315.6.....	254
ANEXO 12.9.....	256
PRUEBA PF 9: Q AB = 0M3/S Y QC = 100M3/S.....	256
ANEXO 12.9.1.....	256
PRUEBA PF9- 1312.....	256
ANEXO 12.9.2.....	258
PRUEBA PF9 – 1315.6.....	258
ANEXO 12.10.....	260
PRUEBA PF 10: Q AB = 20M3/S Y QC = 100M3/S.....	260
ANEXO 12.10.1.....	261
PRUEBA PF10 – 1312.....	261
ANEXO 12.10.2.....	263
PRUEBA PF10 – 1315.6.....	263
ANEXO 12.11.....	265
PRUEBA PF 11: Q AB = 50M3/S Y QC = 100M3/S.....	265
ANEXO 12.11.1.....	265
PRUEBA PF11 – 1312.....	265
ANEXO 12.11.2.....	267
PRUEBA PF11 – 1315.6.....	267
ANEXO 12.12.....	269
PRUEBA PF 12: Q AB = 80M3/S Y QC = 100M3/S.....	269
ANEXO 12.13.....	272
PRUEBA PF 13: Q AB = 100M3/S Y QC = 50M3/S.....	272

ANEXO 12.13.1.....	272
PRUEBA PF13 – 1312.....	272
ANEXO 12.13.2.....	274
PRUEBA PF13 – 1315.6.....	274
ANEXO 12.14.....	276
PRUEBA PF 14: Q AB = 100M <sup>3</sup> /S Y QC = 80M <sup>3</sup> /S.....	276
ANEXO 12.15.....	279
PRUEBA PF 15: Q AB = 100M <sup>3</sup> /S Y QC = 100M <sup>3</sup> /S.....	279
ANEXO 12.16.....	281
PRUEBA PF 16: Q AB = 100M <sup>3</sup> /S Y QC = 100M <sup>3</sup> /S.....	281

## ÍNDICE ANEXOS FOTOGRÁFICOS

<b>ANEXO 1.....</b>	<b>284</b>
FUNCIONAMIENTO NORMAL DE LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN.....	284
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>285</b>
<b>PRUEBAS DE SUMERGENCIA VS VORTICIDAD.....</b>	<b>285</b>
<b>ANEXO 3.....</b>	<b>287</b>
ESTRUCTURAS ANTIVÓRTICES.....	287
<b>ANEXO 4.....</b>	<b>289</b>
MODIFICACIONES EXPEDITIVAS CON UMBRALES DE FONDO.....	289
<b>ANEXO 5.....</b>	<b>291</b>
MODIFICACIONES EXPEDITIVAS CON TRANSICIÓN BRUSCA A LA ENTRADA DE LA CAMARA DE INTERCONEXIÓN.....	291
<b>ANEXO 6.....</b>	<b>292</b>
MODIFICACIONES EXPEDITIVAS CON CLAPETAS.....	292
<b>ANEXO 7.....</b>	<b>297</b>
PRUEBAS CON VARIANTES AL DISEÑO ORIGINAL.....	297
ANEXO 7.1.....	297

COLOCACIÓN DE ROMPE OLAS EN LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN VARIANDO LA COTA DE LA SOLERA PARA UN CAUDAL DE 150 M3/SEG Y COTA DE OPERACIÓN EN LA CAMARA 1311 MSNM.....	297
ANEXO 7.2.....	302
PRUEBAS EXPEDITIVAS: COLOCACIÓN DE UN ROMPE OLAS ADICIONAL EN LA TRANSICIÓN DE ENTRADA A LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN. COTA DE LA SOLERA DEL ROMPE OLAS 1309.5 PARA UN CAUDAL DE 150 M3/SEG Y COTA DE OPERACIÓN EN LA CAMARA 1311 MSNM.....	302
ANEXO 7.3.....	304
COLOCACIÓN DE DOS ROMPE OLAS EN LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN CON UNA SEPARACIÓN DE 50 CM MODELO (10 M MODELO). COTA DE LA SOLERA DEL ROMPE OLAS 1309.5 PARA UN CAUDAL DE 150 M3/SEG Y COTA DE OPERACIÓN EN LA CAMARA 1311 MSNM.....	304
ANEXO 7.4.....	306
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA CON COLCHONES DISIPADORES DE ENERGIA EN LA FASE AB Y LA FASE C.....	306
ANEXO 7.5.....	308
PRUEBAS EXPEDITIVAS: COLOCACIÓN BANDEJAS INCLINADAS CON DIFERENTES DIAMETROS DE LOS ORIFICIOS PARA UN CAUDAL DE 100 M3/SEG ENVIADO POR LA FASE AB.....	308
ANEXO 7.6.....	309
COLOCACIÓN BANDEJAS INCLINADAS CON AGUJEROS DE 0.4 CM DE DIAMETRO MODELO (0.80 M PROTOTIPO) VARIANDO LA INCLINACION PARA UN CAUDAL DE 100 M3/SEG.....	309
<b>ANEXO 8.....</b>	<b>315</b>
PRUEBAS CON EL DISEÑO DEFINITO.....	315
COLOCACIÓN BANDEJAS INCLINADAS CON AGUJEROS DE 0.4 cm DE DIAMETRO MODELO (0.80 m PROTOTIPO) CON ANGULO DE INCLINACIÓN DE 17 GRADOS, DOS ESTRUCTURAS ROMPEOLAS EN LA CAMARA DE	

INTERCONEXIÓN CON SEPARACIÓN DE 1.50 m (30 m PROTOTIPO)	
UBICADOS EN LA COTA 1309.5 msnm.....	315
PRUEBA FINAL N#01.....	315
QAB = 20m <sup>3</sup> /s y QC = 0m <sup>3</sup> /s.....	315
PRUEBA FINAL N#02.....	325
QAB = 60m <sup>3</sup> /s y QC = 0m <sup>3</sup> /s.....	325
PRUEBA FINAL N#03.....	331
QAB = 80m <sup>3</sup> /s y QC = 0m <sup>3</sup> /s.....	331
PRUEBA FINAL N#04.....	336
QAB = 100 m <sup>3</sup> /s y QC = 0m <sup>3</sup> /s.....	336
PRUEBA FINAL N#05.....	341
QAB = 100m <sup>3</sup> /s y QC =20m <sup>3</sup> /s.....	341
PRUEBA FINAL N#06.....	346
QAB = 0m <sup>3</sup> /s y QC =20m <sup>3</sup> /s.....	346
PRUEBA FINAL N#07.....	352
QAB = 0m <sup>3</sup> /s y QC = 60m <sup>3</sup> /s.....	352
PRUEBA FINAL N#08.....	356
QAB = 0 m <sup>3</sup> /s y QC = 80m <sup>3</sup> /s.....	356
PRUEBA FINAL N#09.....	361
QAB = 100 m <sup>3</sup> /s y QC = 0m <sup>3</sup> /s.....	361
PRUEBA FINAL N# 10.....	366
QAB = 20 m <sup>3</sup> /s y QC = 100 m <sup>3</sup> /s.....	366
PRUEBA FINAL N# 11.....	373
QAB = 50 m <sup>3</sup> /s y QC = 100 m <sup>3</sup> /s.....	373
PRUEBA FINAL N# 13.....	383
QAB = 100 m <sup>3</sup> /s y QC = 50 m <sup>3</sup> /s.....	383
PRUEBA FINAL N# 14.....	390
QAB = 100 m <sup>3</sup> /s y QC = 80 m <sup>3</sup> /s.....	390
PRUEBA FINAL N# 15.....	394
QAB = 100 m <sup>3</sup> /s y QC = 100 m <sup>3</sup> /s.....	394

## ÍNDICE ANEXOS CÁLCULOS

<b>ANEXO 1.....</b>	<b>400</b>
COMPROBACIÓN DEL DISEÑO DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO BANDEJA CON ORIFICIOS - FASE AB Y C.....	400
<b>ANEXO 2.....</b>	<b>404</b>
COMPROBACIÓN DEL DISEÑO DE LOS ROMPEOLAS.....	404

## ÍNDICE ANEXOS CORRIDAS HEC-RAS

CORRIDAS HEC-RAS.....	408
FIN.....	423

## ÍNDICE ANEXOS PLANOS

### PLANOS MODELO

DETALLE DE IMPLANTACIÓN DE MODELO.....	PLANO Nº 1
DISEÑO ORIGINAL EN PLANTA.....	PLANO Nº 2
CORTES LONGITUDINALES DISEÑO ORIGINAL.....	PLANO Nº 3
DISEÑO DEFINITIVO PLANTA.....	PLANO Nº 4
CORTES LONGITUDINALES DISEÑO DEFINITIVO.....	PLANO Nº 5
ESTRUCTURAS COMPLEMENTARIAS.....	PLANO Nº6

### PLANOS PROTOTIPO

OBRAS DE INTERCONEXIÓN (PLANTA).....	PLANO Nº 7
OBRAS DE INTERCONEXIÓN (PERFIL).....	PLANO Nº 8
OBRAS DE INTERCONEXIÓN (CORTES).....	PLANO Nº 9
TUNEL DE DESCARGA (PLANTAPERFIL-CORTES).....	PLANO Nº 10
CASA DE MÁQUINAS – RAMALES LATERALES.....	PLANO Nº 11
TUNELES DE DESCARGA – ESTRUCTURAS DE SALIDA.....	PLANO Nº 12

## SIMBOLOGÍA

SÍMBOLO	DESIGNACIÓN	UNIDAD
A1	Inclinación del disipador: 17 grados	[ ° ]
A2	Inclinación del disipador : 13 grados	[ ° ]
A3	Inclinación del disipador : 8 grados	[ ° ]
Am	Área hidráulica promedio	[ m <sup>2</sup> ]
b <sub>v</sub>	Ancho del vertedero	[ m ]
Cd	Coefficiente de descarga del vertedero	[ - ]
D <sub>2</sub>	Calado aguas abajo de la estructura rompeolas	[ m ]
e <sub>L</sub>	Longitud de escala	[ - ]
Fr	Número de Froude	[ - ]
Fr <sub>m</sub>	Número de Froude Modelo	[ - ]
Fr <sub>p</sub>	Número de Froude Prototipo	[ - ]
G	Aceleración de la gravedad	[ m/s <sup>2</sup> ]
H´	Sumergencia hacia aguas arriba del rompeolas	[ m ]
H´´	Sumergencia hacia aguas abajo del rompeolas	[ m ]
H <sub>1</sub>	Altura de cresta superior del rompeolas	[ m ]
H <sub>2</sub>	Altura de cresta inferior del rompeolas	[ m ]
h <sub>v</sub>	Carga sobre el vertedero	[ m ]
le	Pendiente de la línea de energía	[ m/m ]
L	Longitud del rompeolas	[ m ]
N	Coefficiente de rugosidad de Manning	[ - ]
N	Exponente de la carga sobre el vertedero	[ - ]
PF#	Prueba final número #	[ - ]

Q	Caudal	[ m <sup>3</sup> /s ]
Q <sub>AB</sub>	Caudal enviado desde la Fase AB	[ m <sup>3</sup> /s ]
Q <sub>C</sub>	Caudal enviado desde la Fase C	[ m <sup>3</sup> /s ]
Q <sub>M</sub>	Caudal enviado desde Molino	[ m <sup>3</sup> /s ]
Q <sub>S</sub>	Caudal de diseño de Sopladora	[ m <sup>3</sup> /s ]
Re	Número de Reynolds	[ - ]
Rh	Radio Hidráulico	[ m ]
Rhm	Radio hidráulico promedio	[ m ]
V	Velocidad	[ m/s ]
V1	Velocidad en la sección 1	[ m/s ]
V2	Velocidad en la sección 2	[ m/s ]
Vm	Velocidad promedio	[ m/s ]
W	Altura al vértice del vertedero	[ m ]
Y	Calado	[ m ]
Y1	Calado en la sección 1	[ m ]
Y2	Calado en la sección 2	[ m ]
Ym	Calado promedio	[ m ]
Λ	Factor de Fricción	[ - ]
λ <sub>m</sub>	Factor de fricción en la relación de Darcy – Weisbach para el modelo	[ - ]
λ <sub>n</sub>	Factor de fricción en la relación de Darcy – Weisbach para el prototipo	[ - ]

## **RESUMEN**

El presente proyecto de titulación tiene por objetivo principal, la investigación en modelo físico hidráulico de las Obras de Interconexión entre las centrales Molino y Sopladora. Con este estudio se pretende optimizar la geometría de las estructuras hidráulicas, para que con su correcto funcionamiento ofrezcan la oportuna y adecuada flexibilidad de generación durante el régimen transitorio. De igual modo, deben garantizar y permitir mantener la operación normal de la Central Molino, durante los períodos en que la Central Sopladora no llegare a funcionar.

Para la investigación se construyó un modelo físico diseñado para reproducir los principales fenómenos hidráulicos identificados durante el diseño definitivo de las obras de interconexión. El modelo comprende: los múltiples de descarga de la central Molino, las fases AB y C ya existentes, y las nuevas obras denominadas fase ABC y cámara de interconexión, además se modeló el tramo inicial del pozo vertical de descarga de la cámara.

El estudio experimental se desarrolló en tres etapas: la primera, dedicada al análisis teórico de los fenómenos hidráulicos, al diseño y a la construcción del modelo físico; la segunda, destinada a la calibración del modelo y a la investigación del funcionamiento de las obras con la configuración originalmente propuesta; y, la tercera, que estudia todas las modificaciones requeridas para lograr un óptimo funcionamiento de las Obras de Interconexión.

## **ABSTRACT**

This thesis project has as principal objective, the research in physical hydraulic model of the interconnection between the central Molino and Sopladora. With this study we pretend to optimize the geometry of hydraulic structures, to provide good operation with the timely and proper flexibility during the transitional generation. Similarly, we should secure and help to maintain normal operation of the Central Molino, during the periods when the Central Sopladora does not work.

For this research we build a physical model designed to reproduce the main hydraulic phenomena identified during the final design of the interface structures of the interconnection. The model includes: the multiple discharge of central Molino, phases AB and C actually build and new interface structures called ABC and the interconnection chamber, also we build the initial phase of vertical discharge of the chamber.

The experimental study was conducted in three stages: the first devoted to the theoretical analysis of hydraulic phenomena, design and construction of the physical model, the second, calibration of the model and research the operation of the interface structures originally proposed, and the third, which looks at all the modifications required for the best operation of the interface structures of the Interconnection.

## **PRESENTACIÓN**

En el diseño hidráulico se ha trabajado con coeficientes empíricos y formulaciones desarrolladas en base a la experiencia, dando como resultado que los diseños de gabinete tengan cierto grado de incertidumbre. No siempre el respaldo bibliográfico es garantía de solvencia técnica, sino el uso adecuado de las mismas fuentes de conocimiento por parte del diseñador.

Es así que el uso de la modelación física constituye una alternativa adecuada para la solución de problemas hidráulicos. Los modelos hidráulicos permiten representar los fenómenos físicos para preveer problemas en el funcionamiento óptimo de los prototipos y optimizar los diseños. En el caso de obras de gran magnitud e importancia, como es el desarrollo de las obras de interconexión entre las centrales Molino y Sopladora, el estudio en modelo físico a escala reducida constituye una base importante sobre la cual se decidirá el diseño definitivo de las obras.

El presente trabajo describe la modelación hidráulica a escala reducida (1:20) de las Obras de Interconexión entre las centrales Molino y Sopladora. Estas obras comprenden un túnel de recolección de la descarga del caudal proveniente de las Fases AB y C de Molino que conduce el caudal hasta empatar con una cámara de interconexión mediante una transición gradual. Dicha cámara proporcionará la carga de agua necesaria para la generación eléctrica de la central Sopladora.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Ante la falta de inversiones en proyectos de generación de energía eficiente y barata en el sector eléctrico, particularmente en centrales hidroeléctricas, y debido a la tendencia alta de crecimiento de la demanda de energía que conducen a un incremento en los precios de la energía eléctrica, se vio la necesidad de crear nuevos proyectos de generación hidroeléctrica que satisfagan los requerimientos del país.

Es así que aprovechando la descarga de agua proveniente de la central hidroeléctrica Paute-Molino, se desarrolló el proyecto Sopladora para la generación de 480 megavatios de energía eléctrica.

El proyecto hidroeléctrico Sopladora está situado al nororiente de la provincia del Azuay, en los límites de Morona Santiago; correspondiente a la cuenca del río Paute entre el sitio de descarga de la central Molino y la confluencia del río Paute con el río Cardenillo. Aprovechará un salto bruto de 385.52 m en el río Paute, no requiere de una presa y consta de un túnel de carga que lleva las aguas turbinadas de la central Molino mediante obras de interconexión entre los respectivos sistemas de descarga y de carga.

Las obras de interconexión deben conectar hidráulicamente las Centrales Hidroeléctricas Paute Molino y Sopladora, para que con su correcto funcionamiento ofrezcan la oportuna y adecuada flexibilidad de generación durante el régimen transitorio. De igual modo, deben garantizar la operación normal de la Central Molino, durante los períodos en que la Central Sopladora no llegare a funcionar.

Adicionalmente, mediante la conexión directa de las obras, se asegura mantener una buena calidad de las aguas a ser turbinadas en la Central Sopladora. Se evita

así que los sedimentos originados o procedentes de la cuenca intermedia, pudiesen llegar hasta el túnel de carga de la Central Sopladora.

Dada la importancia de esta obra, se considera que su diseño definitivo debe ser chequeado y ratificado por medio de pruebas en laboratorio. El uso de la modelación física como un medio para lograr los mejores criterios en el dimensionamiento hidráulico-estructural de las obras en los sistemas de conducción de agua, es ampliamente conocido en el país, y en particular por la EPN, institución que mediante Convenios de Colaboración Interinstitucional ha desarrollado estudios similares desde hace unos treinta y cinco años.

Con estos antecedentes, el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (DICA) a través del Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Escuela Politécnica Nacional, sobre la base de la información técnica entregada por los Consultores (Consortio Gerencia Mazar - CGM), desarrolló el estudio experimental en modelo físico sobre el funcionamiento de las obras de interconexión, que permite calificar el diseño original y demostrar la validez de la optimización durante el proceso de diseño definitivo y construcción del aprovechamiento hidroeléctrico Sopladora.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL APROVECHAMIENTO HIDRO ELÉCTRICO SOPLADORA**

En el río Paute, entre las elevaciones 1314.07 y 928.55 msnm, aguas abajo de la central Molino, se estudia el desarrollo del proyecto Sopladora que aprovechará un salto bruto de 385.52m. El aprovechamiento hidroeléctrico captará las aguas turbinadas del proyecto Paute-Molino, que circulan por los túneles de descarga, antes de su entrega al río Paute.

La central hidroeléctrica Molino dispone de dos sistemas de conducción independientes (Fases AB y C), construidos entre los años 1975 y 1991, cada uno con un caudal de diseño de 100 m<sup>3</sup>/s. Los túneles ya existentes descargan las aguas turbinadas al río Paute por medio de vertederos que se encuentran en las cotas 1315.25 y 1315.40msnm de las fases AB y C respectivamente.

Según el diseño propuesto por el Consorcio Gerencia Mazar (CGM), la captación para la central Sopladora se realizará mediante un sistema de túneles y una cámara de interconexión subterránea localizados en la margen izquierda del río Paute.

La casa de maquinas subterránea de Sopladora, se ubicará en la margen derecha del río Paute, entre las quebradas Sopladora y Palmira, previéndose cruzar el río Paute mediante un paso subfluvial.

Los estudios de optimización de potencia de la central Sopladora recomendaron la instalación de tres unidades generadoras tipo Francis, de 50 m<sup>3</sup>/s, cada una, y una altura neta de 362.56m. La potencia instalada de la central será de 487 MW y aportará anualmente 2745 GWh al Sistema Nacional Interconectado.

Para acceder a la zona del proyecto se utiliza la carretera Guarumales - Méndez, desde donde arrancan dos caminos de acceso, el primero al patio de maniobras y el segundo a la casa de máquinas y al túnel de descarga. Las vías están en construcción actualmente y se prevé estarán listas para el inicio de los trabajos de construcción.

El esquema general para el aprovechamiento Sopladora incluye las siguientes obras civiles principales:

Obras de Interconexión:

- Conexión directa con los dos túneles de descarga de la central Molino.
- Cámara de interconexión y descarga intermedia.
- Pozo de interconexión entre la cámara de interconexión y el túnel superior de carga.

Conducción de Carga:

- Túnel superior de carga, con un paso subfluvial del río Paute
- Chimenea de equilibrio
- Trampa de rocas

- Pozo vertical de carga revestido de hormigón
- Tubería de presión subterránea y distribuidor

Central subterránea:

- Túnel de acceso a la central
- Caverna de máquinas
- Caverna de transformadores
- Galería y pozo de cables
- Galerías de acceso para construcción

Sistema de descarga:

- Chimenea de equilibrio inferior
- Túnel de descarga
- Estructura de descarga

### **1.3 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN Y DEL ESQUEMA DE FLUJO A LO LARGO DE LOS DIFERENTES COMPONENTES**

Las obras de interconexión conectan hidráulicamente las Centrales Hidroeléctricas Paute-Molino y Sopladora. La difícil topografía de la zona y las condiciones geológicas del cauce no permiten el diseño de una pequeña presa, que hubiese independizado estas centrales para su funcionamiento en cascada.

El objetivo principal de las Obras de Interconexión es vincular hidráulicamente los sistemas de las centrales Molino y Sopladora, entregando el flujo del agua con cierta flexibilidad durante las diferentes maniobras de operación.

En particular, con las obras de interconexión se persiguen tres objetivos básicos:

- Durante la operación normal de las centrales, las obras de interconexión deben permitir la correcta circulación del flujo y evitar que se desperdicien los

caudales turbinados en la central Molino, inferiores a  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  por los vertederos de excesos.

- Durante el régimen transitorio o de flujo no permanente, los sistemas hidráulicos deben evitar interferirse, impidiendo que los fenómenos transitorios causen interrupción de la generación.
- Mantener la operación normal de la central Molino en los períodos en que la central Sopladora esté en mantenimiento o no funcione por algún motivo.

Los principales componentes del sistema de las obras de interconexión incluyen (ver anexos planos 2 y 3):

- Profundizaciones o cuencos disipadores en los dos túneles de descarga de la Central Molino. El objetivo de la sobre-excavación es proporcionar las condiciones hidráulicas necesarias para el desvío del flujo hacia el túnel de conexión. Se profundiza la solera de los túneles de descarga en 3.78m.
- Un primer tramo de túnel de conexión denominado Fase C1, que comunica el túnel de descarga de la Fase C de la Central Molino con el túnel que viene desde la Fase AB. Este túnel tiene una longitud de 69.25m, un diámetro de excavación de 6.67m, su solera es horizontal y se ubica en la cota 1.309 msnm.
- Un segundo tramo de túnel de conexión denominado Fase ABC, que recoge las aguas procedentes de los dos túneles de descarga de Molino, para conducir las hasta la cámara de interconexión. Tiene una longitud de 117m, diámetro de excavación de 7m hasta antes de la cámara de interconexión en donde el diámetro de excavación varía de 7m a 14m, y altura promedio de 11.7m. La pendiente longitudinal es de 0.115% y su clave se mantiene horizontal; se desarrolla a la misma elevación de la clave de los dos túneles de descarga de la Central Molino. Los puntos de empate están en la cota 1.321msnm.
- Una cámara de interconexión, subterránea, en caverna, de 14m de ancho, 19.2m de altura promedio y 125m de longitud. La clave de la cámara es horizontal y se localiza en la cota 1.321msnm. En el punto más bajo de la

solera, arranca el pozo vertical de interconexión que comunica la cámara con el túnel superior de carga.

- Un vertedero de descarga ubicado en la cota 1315msnm, que entregará el caudal remanente e el túnel de descarga intermedia.
- Un túnel de descarga intermedia que entregará sus aguas al túnel de desvío y que trabajando conjuntamente con los vertederos de los túneles de descarga de Molino permitirá que ésta central continúe funcionando normalmente a pesar que la central Sopladora haya dejado de operar.

#### **1.4 REQUERIMIENTOS DE LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DEL FENÓMENO DE FLUJO A TRAVÉS DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN**

Para simular en modelo físico el flujo a través de las obras de interconexión es necesario analizar varios fenómenos hidráulicos que pueden presentarse en dichas estructuras.

Un fenómeno recurrente son las ondas formadas en la superficie libre del agua a lo largo de los canales y en la cámara de interconexión. Siendo estas últimas de mayor interés, puesto que el nivel de agua en la cámara determina el caudal de ingreso a la Central Sopladora.

Es necesario comprobar que el nivel de la superficie libre calculado sea similar al valor real. En los cálculos hidráulicos se asumen hipótesis que simplifican y facilitan su solución matemática, como despreñar el efecto de la viscosidad y suponer flujo bidimensional.

De igual manera se debe establecer el nivel mínimo de funcionamiento de la cámara de interconexión. Este nivel debe ser determinado garantizando la carga de agua necesaria para la generación de energía en la central Sopladora y evitando la presencia de vorticidad que produce introducción de aire a la tubería de carga.

Para caudales mayores a  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  es necesario comprobar que el nivel en los fosos de las unidades no supere la cota de seguridad para el funcionamiento adecuado de las turbinas de la Central Molino (1320msnm).

Es recomendable que las fases AB y C trabajen con flujo subcrítico, tal como operan en la actualidad independientemente. Un aumento de velocidad implicaría futuros problemas de desgaste del hormigón de los túneles. El flujo a través de las nuevas obras debe trabajar también en régimen subcrítico, para lo cual se debe analizar la incidencia de los colchones disipadores.

## **1.5 OBJETIVOS, ALCANCE Y LIMITACIONES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN**

El objetivo de la investigación en modelo físico es la optimización de la geometría de las estructuras hidráulicas para alcanzar un funcionamiento adecuado y eficiente de las obras de interconexión de las centrales.

Entre los objetivos técnicos particulares de la investigación experimental, se señala la necesidad de comprobar y definir los niveles de la superficie libre del agua en los fosos de cada una de las unidades, los niveles de agua en la cámara de interconexión así como los niveles y caudales a lo largo de las descargas de Molino y el túnel de interconexión.

Otros objetivos técnicos particulares agrupados por obras son:

### Túneles de Interconexión

- Verificar que las obras de profundización de la solera y el túnel de interconexión funcionen apropiadamente, logrando el desvío del agua hacia la cámara de interconexión, sin permitir el desperdicio de caudales menores a  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  por los vertederos existentes en las descargas de la Central Paute - Molino.

- Comprobar el funcionamiento hidráulico del túnel de interconexión, para lograr que funcione con flujo tranquilo y que entregue apropiadamente las aguas a la cámara de interconexión. Verificar que a lo largo del perfil del flujo no se presenten singularidades que afecten el funcionamiento tranquilo para todo el rango de caudales de funcionamiento.
- Determinar si se necesita una obra de entrega especial a la cámara de interconexión y en caso de necesitarla, que la estructura propuesta funcione perfectamente y no cause perturbaciones en el espejo de aguas de la cámara de interconexión.

### Cámara de interconexión

- Verificar el funcionamiento de la cámara de interconexión bajo las diferentes combinaciones de niveles y caudales de ingreso.
- Determinar los niveles operativos de la cámara que permitan el ingreso de los caudales entregados por la Central Molino sin desperdiciar agua en los vertederos de descarga existentes, ni por el vertedero de la descarga intermedia.
- Comprobar si el nivel del vertedero de la cámara de interconexión es correcto para no permitir el desperdicio de caudales.
- Investigar si en el inicio de la cámara de interconexión es indispensable la construcción de alguna obra especial para obtener una distribución adecuada del flujo y las menores perturbaciones en el espejo de aguas de la cámara.
- Investigar la necesidad de modificar la boca de salida hacia el foso de carga o diseñar las obras o dispositivos que eviten el ingreso de aire o la formación de vórtices en todo el rango de variación de caudales y niveles en la cámara.

Para la investigación se construye un modelo hidráulico diseñado para reproducir los principales fenómenos hidráulicos identificados durante el diseño de las obras de interconexión. El modelo comprende los múltiples de descarga de la central Molino hasta el tramo inicial del pozo vertical de descarga de la cámara de interconexión.

El estudio experimental se desarrollará en tres etapas: la primera, dedicada al análisis teórico de los fenómenos hidráulicos, al diseño y a la construcción del modelo físico; la segunda, destinada a la calibración del modelo y a la investigación del funcionamiento de las obras con la configuración originalmente propuesta; y, la tercera, que estudiará todas las modificaciones requeridas para lograr que las obras funcionen adecuada y eficientemente, alcanzando los objetivos de la investigación.

## **CAPÍTULO 2**

### **GENERALIDADES SOBRE LA MODELACIÓN FÍSICA**

#### **2.1 METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN EN MODELO FÍSICO DE UN FENÓMENO DE FLUJO A SUPERFICIE LIBRE. TIPOS DE MODELOS**

Los fenómenos hidráulicos como expresión del mundo natural, son tan complejos que sólo es posible analizarlos parcialmente. Uno de los instrumentos más poderosos que se dispone para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua y su interacción con las estructuras es la modelación.

Un modelo es una representación simplificada de un aspecto de la naturaleza y, en muchos casos, de las obras construidas en ella.<sup>1</sup> Los modelos hidráulicos permiten estudiar el comportamiento del flujo y perfeccionar los diseños antes de iniciar la construcción de las obras.

Para que la investigación ofrezca resultados válidos y confiables se debe llevar a cabo una estrategia. Este proceso de investigación abarca los términos de referencia, el suministro de la información básica, el desarrollo de la investigación y la interpretación de los resultados.

##### *Términos de Referencia*

Constituyen el planteamiento del problema por resolver. Es un trabajo conjunto entre el diseñador y el ingeniero investigador, el primero es el encargado de elaborar los diseños hidráulicos en gabinete sin conocer los fenómenos que se pueden presentar y el segundo es el que construye los diseños a una escala determinada, investiga, analiza e interpreta los resultados de los fenómenos hidráulicos observados dando la mejor solución técnica-económica para el diseño. Los términos de referencia deben reflejar la compatibilidad entre los objetivos de la investigación, el tiempo y los recursos disponibles.

### Información Disponible

La confiabilidad del modelo depende en gran medida de la cantidad y la calidad de la información que se suministre. El investigador deberá tener la mayor cantidad de información referente a cálculos, planos y la memoria descriptiva del prototipo.

### Desarrollo de la Investigación

El trabajo coordinado entre el diseñador y el investigador es fundamental, puesto que son muchos los aspectos que intervienen en el diseño de una estructura. El modelo nos da información acerca del funcionamiento hidráulico, pero hay otros aspectos que escapan al campo de actividad del ingeniero investigador y que son manejados por el ingeniero proyectista. El investigador realizará una serie de pruebas hasta que, conjuntamente con el diseñador, lleguen a un acuerdo sobre la optimización del modelo.

### Interpretación de Resultados

Finalizada la investigación en modelo se deben interpretar los resultados y obtener las conclusiones y recomendaciones correspondientes acerca de la validación del diseño.

## **2.1.1 TIPOS DE MODELOS**

Se puede distinguir dos clasificaciones: modelos físicos y modelos matemáticos o de simulación.

### **2.1.1.1 Modelos Físicos**

Son versiones a escala reducida de los sistemas prototipo. Estos a su vez pueden ser:

Geometría Similar.- Las dimensiones del modelo se encuentran a una misma escala en relación con las del prototipo.

Falso o Distorsionado.- La relación de escala entre ancho y profundidad del modelo no corresponde a las del prototipo.

---

<sup>1</sup> Rocha F. Arturo. (2003). Los Modelos como herramienta valiosa para el Diseño Hidráulico.

Disímil.- Estos modelos no guardan semejanza física con su prototipo, sino que son estudiados en base a comparaciones con fenómenos análogos.

### **2.1.1.2 Modelos Matemáticos o de Simulación**

Estos modelos simulan relaciones funcionales que representan factores significativos de los fenómenos modelados. Pueden ser:

Modelos de Simulación Numérica.- Se utilizan ecuaciones que representan el fenómeno estudiado que se resuelven en base al análisis numérico.

Modelos Determinísticos.- Son modelos que representan su relación funcional como causa y efecto.

Modelos Estocásticos.- Se basan en análisis estadísticos donde el fenómeno es considerado como una variable estadística.

Modelos de Planificación y Manejo.- Estos modelos emplean principios de análisis de sistemas e investigación de operaciones.

## **2.2 BASES Y RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO Y PRUEBAS CON UN MODELO DE FONDO FIJO, BAJO EL CRITERIO DE SIMILITUD DE FROUDE Y SEMEJANZA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO**

La simulación del flujo en un modelo físico a escala reducida exige que se cumplan las similitudes: geométrica, cinemática y dinámica. Sin embargo, en la mayoría de los casos, es común que, en un modelo reducido, no se pueda cumplir en forma simultánea con la similitud dinámica de todas las fuerzas que intervienen. Por lo tanto, la similitud en el modelo se restringe únicamente a las fuerzas dominantes.

En la modelación de sistemas a superficie libre, la gravedad, la viscosidad y la rugosidad del contorno son factores importantes, por tanto, es necesario satisfacer simultáneamente las leyes de Froude y de Reynolds. En el caso en que el fluido del modelo sea el mismo que del prototipo, se debe mantener la

---

<sup>2</sup> Hidalgo Marcelo. (2007). Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas. Quito. La Modelación Hidráulica en la Ingeniería Civil, Problemas actuales y soluciones. Folleto para la maestría en Recursos Hídricos. Escuela Politécnica Nacional. Quito

similitud de Froude, así, el número de Reynolds del modelo va a ser menor que el de prototipo<sup>2</sup>.

La ausencia de similitud de las fuerzas secundarias produce efectos de escala, que durante la investigación deben ser reducidos al mínimo y que deben ser evaluados durante el análisis y el procesamiento de la información.

### 2.2.1 SIMILITUD DE FROUDE

Considerando que el presente proyecto se trata de una modelación con un escurrimiento de agua a superficie libre, en el cual las fuerzas inerciales y gravitacionales son predominantes, se define que el criterio de similitud según Froude es el que rige el modelo.

EL criterio de Froude. Esto significa que el Froude en el modelo, en lo posible, debe ser igual al del prototipo<sup>3</sup>.

$$Fr_m = Fr_p \quad (1.1)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (1.2)$$

Donde:

$Fr_m$  = Froude Modelo

$Fr_p$  = Froude Prototipo

$V$  = Velocidad

$g$  = Aceleración de la gravedad

$y$  = Calado

---

<sup>3</sup> Castro Marco. Análisis Dimensional y Modelación Física en Hidráulica.

La modelación física de las obras de interconexión del Proyecto Sopladora cumple con el criterio de similitud de Froude. Los cálculos realizados para adoptar esta condición se muestran en las siguientes tablas.

Cálculo del Número de Froude en el Modelo:

FASE AB										
Nº	Q (m3/s)	Y1 (cm)	A1 (m2)	v1 (m/s)	Fr 1	Y2 (cm)	A2 (m)	v2 (m)	Fr2	Fr medio
1	0.0107	17.05	0.0569	0.188	0.15	17.85	0.0595	0.180	0.14	0.14
2	0.0216	20.3	0.0677	0.319	0.23	21	0.0700	0.308	0.21	0.22
3	0.0322	22.7	0.0757	0.425	0.28	23.6	0.0787	0.409	0.27	0.28
4	0.0436	25.1	0.0837	0.521	0.33	26.1	0.0870	0.501	0.31	0.32
5	0.0492	26.9	0.0897	0.548	0.34	27.5	0.0917	0.536	0.33	0.33

TABLA Nº 2.1 Cálculo del Número de Froude en la Fase AB – Modelo

FASE C										
Nº	Q (m3/s)	Y1 (cm)	A1 (m2)	v1 (m/s)	Fr 1	Y2 (cm)	A2 (m)	v2 (m)	Fr2	Fr medio
1	0.0111	15.5	0.052	0.21	0.17	16.3	0.054	0.20	0.16	0.17
2	0.0224	18.9	0.063	0.35	0.26	19.6	0.065	0.34	0.25	0.25
3	0.0335	21.5	0.072	0.47	0.32	22.2	0.074	0.45	0.31	0.31
4	0.0441	23.7	0.079	0.56	0.37	24.3	0.081	0.54	0.35	0.36
5	0.0475	24.3	0.081	0.59	0.38	25.1	0.084	0.57	0.36	0.37

TABLA Nº 2.2 Cálculo del Número de Froude en la Fase C - Modelo

Cálculo del Número de Froude en Prototipo – Corridas en el Programa Hec Ras:

FASE AB										
Nº	Q (m3/s)	Y1 (m)	A1 (m2)	v1 (m/s)	Fr 1	Y2 (cm)	A2 (m)	v2 (m)	Fr2	Fr medio
1	19.17	3.21	21.41	0.90	0.16	3.3	22.01	0.87	0.15	0.16
2	38.65	3.94	26.28	1.47	0.24	4.02	26.81	1.44	0.23	0.23
3	57.52	4.62	30.82	1.87	0.28	4.7	31.35	1.83	0.27	0.27
4	78.08	5.09	33.95	2.30	0.33	5.15	34.35	2.27	0.32	0.32
5	87.97	5.35	35.68	2.47	0.34	5.41	36.08	2.44	0.33	0.34

TABLA Nº 2.3 Cálculo del Número de Froude en la Fase AB – Prototipo

FASE C										
Nº	Q (m3/s)	Y1 (m)	A1 (m2)	v1 (m/s)	Fr 1	Y2 (cm)	A2 (m)	v2 (m)	Fr2	Fr medio
1	19.81	3.3	22.01	0.9	0.16	3.42	22.81	0.87	0.15	0.15
2	40.00	4.06	27.08	1.5	0.23	4.16	27.75	1.44	0.23	0.23
3	59.92	4.78	31.88	1.9	0.27	4.88	32.55	1.84	0.27	0.27
4	78.93	5.24	34.95	2.3	0.31	5.32	35.48	2.22	0.31	0.31
5	84.99	5.4	36.02	2.4	0.32	5.48	36.55	2.33	0.32	0.32

TABLA Nº 2.4 Cálculo del Número de Froude en la Fase C - Prototipo

Realizando la comparación entre los datos obtenidos en modelo y los de prototipo se tiene.

FASE AB					
Nº	Q modelo (m3/s)	Q prototipo (m3/s)	Fr modelo	Fr prototipo	Diferencia Fr
1	0.0107	19.17	0.14	0.16	0.02
2	0.0216	38.65	0.22	0.23	0.01
3	0.0322	57.52	0.28	0.27	0.00
4	0.0436	78.08	0.32	0.32	0.00
5	0.0492	87.97	0.33	0.34	0.01

TABLA Nº 2.5 Comparación Froude modelo – prototipo Fase AB

La tabla 2.5 muestra que los valores de Froude obtenidos en el modelo son muy similares a los del prototipo. La diferencia promedio entre modelo y prototipo es 0.008 que en porcentaje corresponde a un 3%.

### 2.2.2 SEMEJANZA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL MOVIMIENTO

En función del coeficiente de resistencia del prototipo y de la escala geométrica seleccionada se define el coeficiente de resistencia del modelo, que permite escoger el material de construcción del modelo para que su rugosidad responda al coeficiente de resistencia calculado.

La simulación apropiada del efecto viscoso, que se atribuye a la fricción interna y al rozamiento con el contorno en un modelo no distorsionado, operado de acuerdo con el criterio de similitud de Froude, exige que el factor adimensional de fricción en la ecuación de Darcy-Weisbach sea igual en el modelo y en el prototipo<sup>4</sup>.

$$\lambda_m = \lambda_p \quad (2.1)$$

Donde:

$\lambda_m$  = Factor de fricción en la relación de Darcy-Weisbach para el modelo

$\lambda_p$  = Factor de fricción en la relación de Darcy-Weisbach para el prototipo.

<sup>4</sup> Castro Marco. *Análisis Dimensional y Modelación Física en Hidráulica*.

Para la selección del material adecuado para la construcción del modelo, es necesario tabular una serie de cálculos para que el factor de fricción cumpla las condiciones establecidas. Se imponen varios valores de coeficiente de rugosidad - n hasta que  $\lambda_m = \lambda_p$ . Una vez satisfecha esta igualdad, se procede a escoger el material que cumpla con el valor de n.

Bajo la hipótesis de flujo permanente, en el caso de los ramales de las fases AB y C, se evalúan los números de Reynolds  $Re = v \cdot 4Rh/n$  y el coeficiente de fricción  $\lambda$ , para contorno rugoso, en el prototipo y para contorno liso, en el modelo, en una gama seleccionada de caudales. Los valores de  $\lambda$  calculados se muestran en las tablas 2.6, 2.7 y 2.8.

Para el cálculo del factor de fricción  $\lambda$  (ecuación 2.4), se igualan las ecuaciones 2.2 y 2.3 (cálculo de la velocidad según Darcy-Weisbach y Manning respectivamente).

$$V = \sqrt{\frac{8g}{\lambda} Rh^{\frac{1}{2}} le^{\frac{1}{2}}} \quad (2.2)$$

$$V = \frac{1}{n} Rh^{\frac{2}{3}} le^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$\lambda = \frac{8g \cdot n^2}{Rh^{\frac{1}{3}}} \quad (2.4)$$

Donde:

$\lambda$  = Factor de Fricción

Rh = Radio Hidráulico

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

V = Velocidad

g = Gravedad

le = Pendiente de la línea de energía

FASE AB									
Nº	Q	Y1	Y2	Ym	Am	Rhm	n	$\lambda$	$\lambda$ medio
	(m <sup>3</sup> /s)	(cm)	(cm)	(cm)	(m <sup>2</sup> )	(m)			
1	0.011	17.1	17.9	17.45	0.05820	0.0853	0.0085	0.0129	0.0124
2	0.022	20.3	21.0	20.65	0.06887	0.0923	0.0085	0.0125	
3	0.032	22.7	23.6	23.15	0.07721	0.0969	0.0085	0.0123	
4	0.044	25.1	26.1	25.60	0.08538	0.1010	0.0085	0.0122	
5	0.049	26.9	27.2	27.03	0.09013	0.1031	0.0085	0.0121	
FASE C									
1	0.011	15.5	16.3	15.90	0.05303	0.0814	0.0085	0.0131	0.0125
2	0.022	18.9	19.6	19.25	0.06420	0.0894	0.0085	0.0127	
3	0.033	21.5	22.2	21.85	0.07287	0.0946	0.0085	0.0124	
4	0.044	23.7	24.3	24.00	0.08004	0.0984	0.0085	0.0123	
5	0.048	24.3	25.1	24.70	0.08237	0.0995	0.0085	0.0122	

TABLA N° 2.6 Cálculo de n en modelo

FASE AB							Re promedio Fase	Re	
Nº	Calado (cm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	A (m <sup>2</sup> )	Rh (m)	v (m/s)	Re			
1	17.05	0.0107	0.057	0.084	0.188	5.98E+04	1.46E+05	1.50E+05	
2	20.3	0.0216	0.068	0.092	0.319	1.10E+05			
3	22.7	0.0322	0.076	0.096	0.425	1.54E+05			
4	25.1	0.0436	0.084	0.100	0.521	1.97E+05			
5	26.9	0.0492	0.090	0.103	0.548	2.12E+05			
FASE C							1.54E+05		1.50E+05
1	15.5	0.0111	0.052	0.080	0.214	6.48E+04			
2	18.9	0.0224	0.063	0.089	0.355	1.18E+05			
3	21.5	0.0335	0.072	0.094	0.467	1.65E+05			
4	23.7	0.0441	0.079	0.098	0.558	2.06E+05			
5	24.3	0.0475	0.081	0.099	0.586	2.18E+05			

TABLA N° 2.7 Cálculo de el Número de Reynolds en Modelo

<b>Comparación <math>\lambda</math> entre Modelo - Prototipo</b>							
FASE AB							
Nº	Q modelo (m <sup>3</sup> /s)	Q prototipo (m <sup>3</sup> /s)	$\lambda$ modelo	$\lambda$ prototipo	Diferencia $\lambda$	% Diferencia $\lambda$	
1	0.011	19.173	0.0129	0.0136	0.0007	0.0528	
2	0.022	38.648	0.0125	0.0127	0.0002	0.0141	
3	0.032	57.521	0.0123	0.0121	0.0003	0.0210	
4	0.044	78.078	0.0122	0.0117	0.0005	0.0378	
5	0.049	87.973	0.0121	0.0115	0.0006	0.0467	
FASE C							
Nº	Q modelo (m <sup>3</sup> /s)	Q prototipo (m <sup>3</sup> /s)	$\lambda$ modelo	$\lambda$ prototipo	Diferencia $\lambda$	% Diferencia $\lambda$	
1	0.011	19.814	0.0131	0.0135	0.0004	0.0278	
2	0.022	40.004	0.0127	0.0126	0.0001	0.0070	
3	0.033	59.921	0.0124	0.0119	0.0005	0.0404	
4	0.044	78.926	0.0123	0.0116	0.0007	0.0557	
5	0.048	84.988	0.0122	0.0115	0.0007	0.0612	

TABLA N° 2.8 Comparación  $\lambda$  entre modelo y prototipo

La comparación de  $\lambda$  modelo vs.  $\lambda$  prototipo mostrada en la tabla 2.8 indica que el coeficiente de resistencia de Manning impuesto ( $n=0.0085$ ) es el apropiado para establecer que  $\lambda_m = \lambda_p$ , la mayor diferencia entre estos valores es 0.0007 equivalente a un 0.06%. Por tanto, se cumple con la condición de semejanza del coeficiente de resistencia del movimiento para la modelación hidráulica según la similitud de Froude. Además se determina de acuerdo al valor de  $n$ , que el material a ser usado en la modelación física debe ser el acrílico por tener un coeficiente de rugosidad  $n=0.009$ .

El número de Reynolds promedio,  $Re=1.5 \cdot 10^5$ , obtenido de la tabla 2.7, indica que el flujo es turbulento. Es decir en el fluido predominan las fuerzas de inercia y la viscosidad puede ser despreciada.

### 2.3 RELACIÓN DE ESCALAS ENTRE LAS MAGNITUDES HIDRODINÁMICAS DE UN MODELO CON SIMILITUD DE FROUDE Y SU PROTOTIPO

Los coeficientes adimensionales utilizados para transponer directamente las magnitudes físicas de prototipo a modelo se presentan en la tabla 2.9.

Magnitud	Similitud de Froude
Longitud	$e_L$
Tiempo	$e_L$
Aceleración	1
Velocidad	$e_L^{1/2}$
Caudal	$e_L^{5/2}$
Presión	$e_L$
Energía	$e_L^4$
Fuerza	$e_L^3$

TABLA N° 2.9 Transposición de magnitudes de acuerdo a la similitud de Froude <sup>5</sup>

Donde:

$e_L$  = escala de longitud

<sup>5</sup> Hidalgo Marcelo. (2007). Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas.

## **2.4 CONSIDERACIONES SOBRE LA TRANSPOSICIÓN DE LAS MAGNITUDES FÍSICAS OBTENIDAS EN EL MODELO: NIVELES O PROFUNDIDADES DE AGUA, VELOCIDADES, PRESIONES Y PATRONES DE FLUJO**

### Velocidad:

En el movimiento de masas de agua los cambios en la magnitud y en la dirección de el vector velocidad están controlados y gobernados por la geometría del contorno. Por tanto, las características geométricas de puntos homólogos en modelo y prototipo deben ser semejantes.

### Viscosidad:

El efecto de la fricción interna o viscosidad sobre las características hidrodinámicas del movimiento del agua es pequeño en comparación con la incidencia de la fuerza gravitacional.

### Tensión Superficial:

La consecuencia de la tensión superficial en el movimiento del agua en el prototipo es prácticamente irrelevante. La literatura técnica brinda muchas recomendaciones que limitan o eliminan su efecto, de este modo, en el modelo, la escala de longitudes a ser seleccionada debe ser tal que garantice que las profundidades de agua sean mayores a 3 cm y por lo tanto, también en el modelo, el efecto de la tensión superficial sea despreciable<sup>6</sup>.

### Presión:

Se asume que el flujo es permanente y la distribución de presiones a lo largo de la vertical es de tipo lineal, semejante a la distribución hidrostática.

---

<sup>6</sup> Hidalgo Marcelo. (2007). Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas

Finalmente, el efecto combinado de fenómenos asociados a magnitudes físicas como la tensión superficial, la compresibilidad del agua y la presión de vapor se considera muy pequeño en las condiciones del prototipo. Sin embargo, es necesario comprobar no sola la incidencia de la fuerza predominante, sino la de las demás que se las desprecia al adoptar una similitud, pues estas pueden conducir a desviaciones que pueden limitar al alcance de la investigación, sus resultados y la calidad de la modelación.

## 2.5 CONCLUSIONES

Se utilizó la modelación física para el estudio de las obras de interconexión del proyecto Sopladora, manteniendo una relación de escala en modelo y prototipo. Los modelos físicos de geometría similar permiten visualizar los fenómenos hidráulicos sin distorsiones y más cercanos a la realidad.

Se analizaron las fuerzas predominantes en el modelo para escoger el criterio de similitud dinámica a utilizar. La gravedad y rugosidad del contorno son factores importantes en los modelos a superficie libre.

El criterio de similitud de Froude fue el adoptado debido a la modelación de las obras de interconexión se trata de un sistema a superficie libre. El número de Froude obtenido en modelo fue muy similar al del prototipo. La diferencia promedio de estos valores fue 0.008 con un porcentaje de error del 3%.

La rugosidad del modelo ( $n = 0.0085$  – acrílico) fue seleccionada de manera que el coeficiente de pérdida permanezca igual tanto en modelo como en prototipo. Las pruebas realizadas para determinar este coeficiente dieron resultados similares en modelo y prototipo ( $\lambda = 0.0123$ ).

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN**

#### **3.1 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DE LONGITUDES. ESCALAS DERIVADAS**

El criterio de similitud según Froude condiciona la selección de la escala geométrica entre el modelo y el prototipo.

Se procuró escoger el modelo de mayor tamaño, que pueda ser construido, considerando las disponibilidades físicas de espacio, de caudales y simultáneamente, de la carga hidráulica al inicio del modelo; esto es, garantizando su condición de frontera o de borde inicial. Debe mantenerse el estado inercial del modelo similar al del prototipo en su conjunto, y sus características geométricas deben estar representadas a detalle; su influencia debe ser idéntica tanto en el modelo como en el prototipo.

La escala de longitudes seleccionada fue 1:20, sobre la base del análisis realizado para la presentación de la propuesta técnico-económica por parte de la EPN y considerando los aspectos mencionados en los párrafos anteriores. La escala 1:20 permite definir los siguientes valores para las relaciones entre las magnitudes características del flujo, como se indica en la tabla siguiente:

<b>MAGNITUD</b>	<b>PROTOTIPO</b>	<b>MODELO</b>
Dimensiones máximas del área de simulación	300 x 280 m	15.0 x 14.0 m
Ancho del túnel en la aproximación	6.67 m	0.33 m
Longitud máxima del túnel en la aproximación	200.0 m	10.00 m
Desnivel máximo	25.0 m	1.25 m
Altura máxima o profundidad de agua	20.7 m	1.035 m
Altura mínima o profundidad más pequeña	2.72 m	0.14 m
Diámetro del túnel vertical	7.20 m	0.36 m
Caudal máximo de operación	200 m <sup>3</sup> / s	111.80 l/s
Caudal mínimo de operación	20.0 m <sup>3</sup> / s	11.18 l/s

TABLA N° 3.1 Magnitudes Características (escala 1:20)

Los materiales definidos para la construcción del modelo, a pesar de ser lisos, definen coeficientes de resistencia al flujo adecuados para la simulación proyectada según Froude y con representación apropiada del efecto viscoso.

### **3.2 ESTRUCTURAS PRINCIPALES Y COMPLEMENTARIAS DEL MODELO FÍSICO**

El modelo se encuentra ubicado en el Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Escuela Politécnica Nacional. El laboratorio cuenta con un sistema de bombeo de capacidad 600lt/s, un canal de recirculación de flujo y varias tomas de agua a lo largo del perímetro.

### 3.2.1 ESTRUCTURAS CONSTITUTIVAS DEL MODELO

El modelo físico consta de las siguientes estructuras:

#### Estructuras principales:

- Tanques de alimentación al modelo
- Tanques de entrada
- Canal Fase AB
- Canal Fase C
- Canal Descarga Fase AB
- Canal Descarga Fase C
- Canal Fase C1
- Canal Fase ABC
- Cámara de Interconexión
- Vórtice de Descarga de la Cámara de Interconexión

#### Estructuras complementarias:

- Estructura metálica de soporte del modelo
- Entarimado de madera
- Canal de descarga Fase AB
- Canal de descarga Fase C
- Canal de descarga Vórtice C.I
- Canal de descarga intermedia C.I

El prototipo, para su respectivo estudio, ha sido dividido en cuatro fases, las cuales tienen un desarrollo longitudinal desde la abscisa 0+000 a la abscisa 0+479. A la escala 1:20 del modelo, esto se representa por un desarrollo de 23.95m. (Ver anexos plano 1).

La siguiente tabla muestra la distribución de la longitud total en cada una de las fases.

FASE	DESCRIPCIÓN		ABSCISA	
			PROTOTIPO (m)	MODELO (m)
AB	Canal salida turbinas	Salida de las turbinas	0	0
	Transición S = 2.69%	Inicio transición	24,8	1,24
		Fin de transición	77,8	3,89
	Túnel Fase AB S = 0.3%	Inicio del túnel	77,8	3,89
		Fin del túnel	237,2	11,86
Cuenco disipador Fase AB	Inicio cuenco	237,2	11,86	
	Fin cuenco	281,0	14,05	
Túnel Descarga Fase AB	Inicio túnel descarga	281,0	14,05	
	Vertedero descarga	341,0	17,05	
C	Canal salida turbinas	Salida de las turbinas	0	0
		Inicio transición	24,8	1,24
	Transición S = 2.69%	Inicio transición	24,8	1,24
		Fin de transición	77,8	3,89
	Túnel Fase C S = 0.3%	Inicio del túnel	77,8	3,89
Fin del túnel		316,0	15,8	
Cuenco disipador Fase C	Inicio cuenco	316,0	15,8	
	Fin cuenco	446,4	22,32	
Túnel Descarga Fase C	Inicio túnel descarga	446,4	22,32	
	Vertedero descarga	479,0	23,95	
C1	Canal Unión Fase AB y C	Cruce cuenco fase C	0	0
		Cruce cuenco fase AB	44,0	2,2
ABC	Canal Descarga a Cámara Interconexión	Cruce cuenco fase AB	0	0
		Fin canal	97,4	4,87
	Transición	Inicio transición	97,4	4,87
		Fin de transición	116,4	5,82
Cámara de Interconexión	Inicio cámara interconexión	116,4	5,82	
	Fin cámara interconexión	241,4	12,07	

TABLA N° 3.2 Distribución de la longitud total de las fases del modelo obras de interconexión Sopladora

La figura 3.1 muestra el esquema de las fases del modelo.

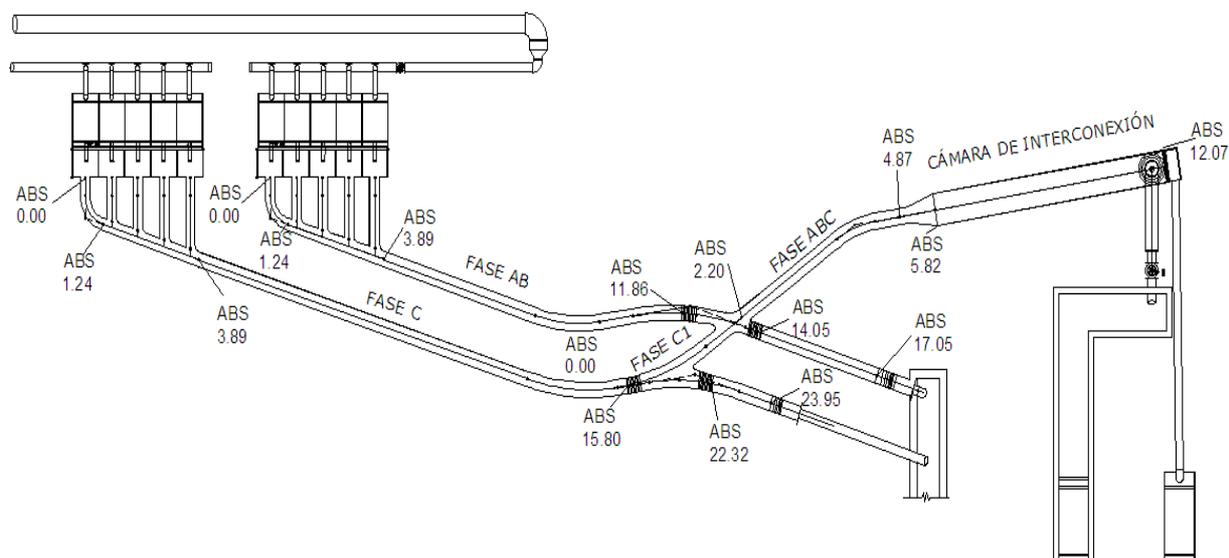


GRÁFICO N° 3.1 Esquema de las Fases del Modelo Hidráulico de las Obras de Interconexión

### 3.2.2 GENERALIDADES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA

El modelo bajo análisis se conecta al sistema de distribución de caudales del Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas, por medio de una tubería de PVC de 200mm, la cual a su vez, conduce el caudal a los diez tanques de alimentación, localizados a 3.61m de la losa del laboratorio, mediante tuberías de PVC de 110mm, como se muestra en la fotografía 3.1. Adicionalmente, se utiliza tuberías de PVC de 90mm, para dirigir el agua de cada uno de los tanques de alimentación a los tanques que representarían los sitios de descarga del flujo de agua de cada turbina.

La regulación del caudal de servicio al modelo se la realizó a través de la operación de dos válvulas de compuerta del laboratorio, dos adicionales para controlar el flujo de entrada a las fases AB y C, y válvulas tipo bola individuales en cada una de las tuberías de alimentación de los cinco tanques de alimentación previsto para cada fase (AB y C). Esto permite imponer las condiciones de borde o de frontera al inicio del modelo, con un adecuado grado de precisión.



FOTOGRAFÍA N° 3.1 Conexión del modelo al sistema de distribución de agua del Laboratorio

Para verificar el caudal de ingreso a las fases AB y C, los tanques de alimentación están previstos de vertederos triangulares ( $90^\circ$ ) de pared delgada.

Las fotografías 3.2 y 3.3 muestran los tanques de alimentación del modelo con sus respectivos vertederos triangulares, los tanques que representan el sistema de turbinas de la Central Molino, las unidades de recolección de caudal de las turbinas hacia el canal principal de las Fases AB y C, así como también, la cámara de interconexión y la tubería de descarga a la Central Sopladora.



(a)



(b)

FOTOGRAFÍA N° 3.2 Vista de los tanques del modelo: a) Tanques de alimentación; b) Tanques representativos del sistema de turbinas de la Central Molino



(a)



(b)



(c)

FOTOGRAFÍA N° 3.3 Componentes del modelo: (a) Unidades de recolección de los caudales descargados de los tanques representativos del sistema de turbinas; (b) Fase C1 - Interconexión de las Fases AB y C; (c) Cámara de Interconexión

Una vez que el flujo ha transitado por el modelo, éste descarga los caudales a través de cuatro canales ubicados al final de las fases AB, C y de la cámara de interconexión, para luego pasar a través de su correspondiente vertedero de aforo, en el cual se mide el caudal de circulación. Para la medición del caudal de descarga de las fases AB y C se utilizó un vertedero de pared delgada rectangular sin contracciones y, en el caso de la cámara de interconexión, dos vertederos triangulares de pared delgada. La medición se realizó a través de un sistema piezométrico y la correspondiente curva de descarga: caudal (Q) vs. altura de carga (h).

### **3.3 IMPLANTACIÓN DEL MODELO Y DE LAS ESTRUCTURAS COMPLEMENTARIAS**

#### **3.3.1 REVISIÓN DEL ÁREA Y ALTURA DISPONIBLE EN LABORATORIO**

El área disponible en el laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental comprende  $560\text{m}^2$  (14m x 40m), siendo su altura mínima 3.43m. Por otra parte, el área que ocupa el modelo con la escala seleccionada, 1:20, es  $210\text{m}^2$  (7m x 30m), magnitud que no presenta inconvenientes para la implantación. Sin embargo, la altura requerida para la construcción del modelo en el laboratorio está condicionada por la cota máxima, 1315msnm y mínima, 1256.87msnm, en donde la diferencia corresponde a una elevación de 3.24m en escala modelo. Se deduce que el espacio del laboratorio es suficiente para la implantación del modelo

#### **3.3.2 SELECCIÓN DEL SITIO DE IMPLANTACIÓN DEL MODELO**

Tomando en cuenta las características geométricas de ancho, largo y altura del modelo, y conociendo de antemano que el mismo va a ser dotado de caudal desde la tubería madre del laboratorio ubicada en su periferia, se escogió el sitio adecuado para su implantación. (Ver anexos planos 1).

### 3.3.3 REPLANTEO

En este punto se procedió a replantear el modelo desde la cámara de interconexión. Se trazaron los ejes centrales de los canales con sus respectivos ángulos de inclinación correspondientes a puntos de cambio de dirección del modelo. La herramienta utilizada en este proceso fue el teodolito.

Para iniciar el replanteo se partió de los planos de diseño del modelo (ver anexos plano 2). Se decidió trazar las alineaciones de los ejes de los canales del modelo en el piso del laboratorio para posteriormente ubicar la estructura de soporte sobre dichas líneas de referencia. Los puntos de cambio de dirección fueron remarcados con clavos de acero y una circunferencia alrededor denominándolos de igual manera, como se muestra en el plano 2.

Tomando en cuenta que existen ciertos obstáculos en el laboratorio, fue necesario empezar el proceso de replanteo desde el punto 67 que corresponde al centro del eje del vórtice de descarga de la cámara de interconexión. Este punto se encuentra a 53.2cm de separación de una mampostería existente en el laboratorio, que representa un inconveniente en el proceso de replanteo. Para trazar la ubicación exacta de este punto en el laboratorio, se trianguló con los ejes de las columnas 2M y 2K (ver anexos plano 1). A continuación se plantó el teodolito en dicho punto y se estableció un ángulo de  $169^{\circ}21'49''$  que corresponde a la alineación del eje de la cámara de interconexión hasta el punto 63 donde hay un cambio de dirección. Las distancias entre cada punto se las midió con una cinta métrica.

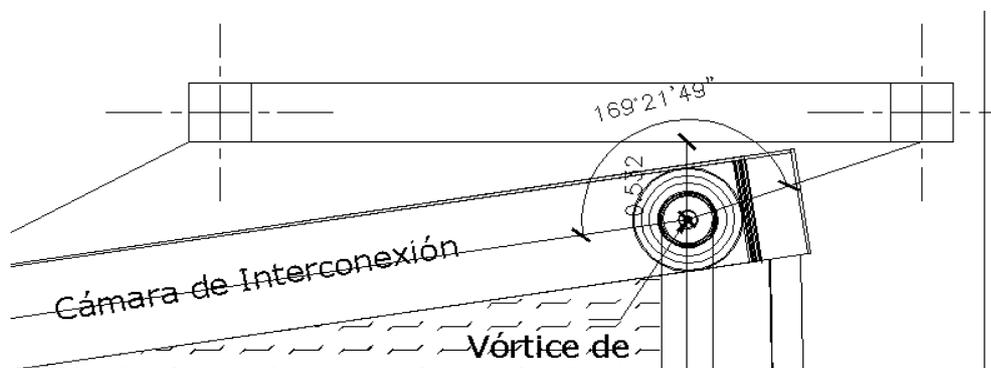


GRÁFICO N° 3.2 Punto de partida en la cámara de interconexión para el replanteo del modelo

De igual manera, una vez marcado el punto 63 en el piso del laboratorio, se plantó el teodolito y se enceró con el anterior punto 67 tomando en cuenta el correspondiente ángulo de inclinación (ver anexos plano 2). Siguiendo el mismo proceso se replantearon los puntos 2, 14, 22, 25 de la Fase C y los puntos 32, 43, 51, 55 de la Fase AB.

Una vez trazadas las alineaciones en el piso y marcados los puntos de cambio de dirección, se establecieron otros puntos relevantes únicamente con ayuda de la cinta métrica.

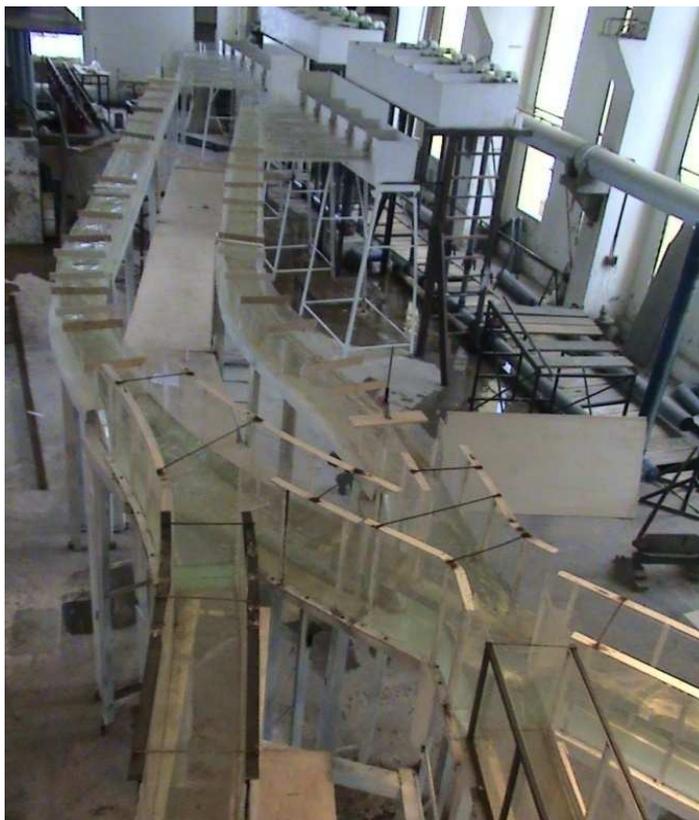
### **3.4 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN E INSTRUMENTACIÓN BÁSICA**

#### **3.4.1 MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN**

Todos los canales fueron construidas con acrílico transparente, con excepción de la cámara de interconexión, cuyo fondo y pared posterior son de madera. Las estructuras fueron instaladas con sus respectivas pendientes geométricas y alineadas sobre soportes construidos con perfiles metálicos, en un área aproximada de 210m<sup>2</sup>. Las fotografías siguientes muestran el modelo construido en laboratorio.



FOTOGRAFÍA N° 3.4 Vista del modelo hacia aguas abajo



FOTOGRAFÍA N° 3.5 Vista del modelo hacia aguas arriba

### 3.4.2 INSTRUMENTACIÓN E EQUIPAMIENTO

La medición de los niveles o profundidades de agua se efectuó con limnímetros, que tienen una precisión 0.1mm y tienen adosado un nonius correspondiente.

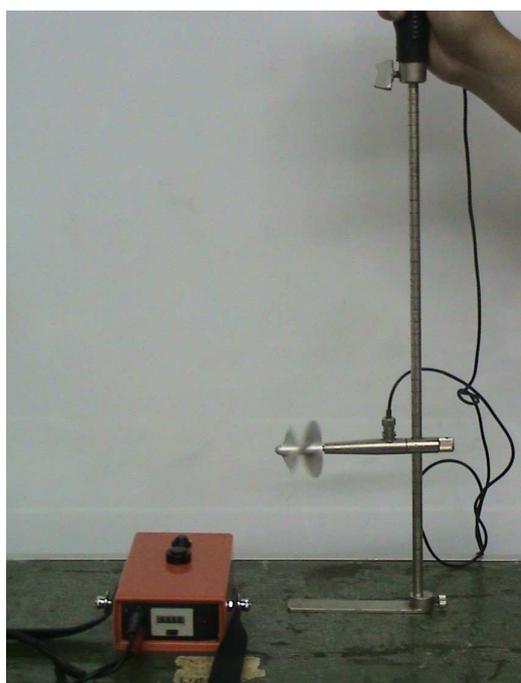


FOTOGRAFÍA N° 3.6 Limnómetro para medición de calados en canales Fase AB y C



FOTOGRAFÍA N° 3.7 Limnómetro para la medición de calados en canales de descarga Fase AB, C y C.I

Las mediciones de velocidad se realizó utilizando un micromolinete con diámetro de 50mm, mostrado en las fotografía 3.8. Los micromolinetes posibilitan mediciones puntuales aun en zonas muy cercanas a las paredes y/o fondo de los canales.



FOTOGRAFÍA N° 3.8 Micromolinete para la medición de velocidades en el modelo

La determinación de los caudales de alimentación así como los caudales de descarga del vórtice de la cámara de interconexión y la descarga intermedia, se la realizó por medio de vertederos triangulares de  $90^\circ$ , debidamente calibrados que ofrecen una excelente precisión (ver fotografías 3.10 a y b). Para la medición de los caudales de descarga de las fases AB y C se utilizaron vertederos rectangulares previamente calibrados, mostrados en las fotografías 3.9 (a) y (b).



(a)



(b)

FOTOGRAFÍA N° 3.9 Vertedero Rectangular - Medición caudal de descarga Fase AB (a) Vista de frente, (b) Vista en perfil



(a)



(b)

FOTOGRAFÍA N° 3.10 Vertedero Triangular  $90^\circ$  - Medición caudal entrada al modelo (a) Funcionamiento del vertedero, (b) Vista de las 10 unidades a la entrada del modelo

## **3.5 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO**

### **3.5.1 NIVELACIÓN DEL MODELO**

Conocidas las cotas del proyecto tanto en prototipo como en modelo, se implantó un nivel de referencia ubicado a 1m de la losa del laboratorio correspondiente a la cota 1273.4msnm prototipo. Con este punto de referencia se estableció las cotas del modelo utilizando un nivel.

### **3.5.2 CONSTRUCCIÓN DE TANQUES DE ALIMENTACIÓN, TANQUES DE ENTRADA AL MODELO Y ARMADO DE TUBERÍAS**

Los tanques de alimentación y entrada al modelo fueron elaborados en madera triplex de 18mm de espesor. Se construyeron dos tanques tanto de alimentación como de entrada, divididos a su vez en cinco unidades, para alimentar a las dos fases del proyecto.

Las dimensiones de los tanques de alimentación son: 1.20m x 3.50m x 0.60m, correspondientes a largo, ancho y alto, y están ubicados a una cota de 3.61m. Las medidas de los tanques de entrada son: 0.70m x 3.50m x 0.60m a una cota de 2.81m.

El abastecimiento de caudal se lo realiza a través de dos tuberías de presión de PVC de 200mm, una por cada fase, que se conectan a la tubería madre del laboratorio. La regulación de caudal se la efectúa usando válvulas de compuerta de 200mm de diámetro. El caudal es repartido a cada unidad de entrada por medio de tuberías de presión de PVC de 110mm de diámetro que se conectan a la tubería de 200mm a través de collarines, y es regulado por medio de válvulas bola de 110mm de diámetro. Para conectar los tanques de alimentación con los de entrada al modelo se usó tubería de 90mm de diámetro.

### 3.5.3 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

Para la construcción de la estructura de soporte se utilizó perfiles metálicos tipo L 100x100x6mm. Con los datos de los planos modelo (ver anexos plano 3) se procedió a cortar los perfiles de acuerdo a las dimensiones de cotas y abscisas correspondientes dejando un margen de 2cm en las cotas para la nivelación, dimensiones que se indican en las tablas 3.3, 3.4 y 3.5.

FASE AB						
Estación	Abscisa (m)	Nº hierros	Distancia (m)	Cota fondo del canal (m)	Altura de hierro a cortar (m)	Descripción
30	0	2		3.089	3.10	
			0.43			
38	0.43	2		3.089	3.10	
			0.81			
43	1.24	2		3.071	3.08	Inicio Transición
			2.84			Transición
49	3.89	2		3	3.01	Fin Transición
			4.01			
50	7.89	2		2.988	2.99	
			1.75			
52	9.63	2		2.983	2.99	
			0.92			
53	10.55	2		2.98	2.99	Inicio curvatura
			1.31			
54	11.86	2		2.976	2.98	Inicio Cuenco
			0.42			
profund		2			0.01	
			1.36			
56	13.6	2		2.788	2.79	Fin curvatura
			0.09			
profund		2			0.01	
			0.41			
57	14.05	2		2.97	2.98	Fin Cuenco
			3.31			
58	17.35	2		2.96	2.97	Inicio Descarga
			1.04			
59	18.39	2		2.908		Fin canal AB

TABLA N° 3.3 Descripción de abscisa y cotas para cortes de estructura metálica Fase AB

FASE C						
Estación	Abscisa (m)	Nº hierros	Distancia (m)	Cota fondo del canal (m)	Altura de hierro a cortar (m)	Descripción
3	0	2		3.089	3.10	
			0.43			
9	0.43	2		3.089	3.10	
			0.81			
15	1.24	2		3.071	3.08	Inicio Transición
			2.65			Transición
20	3.89	2		3	3.01	Fin Transición
			2.3			
	6.19	2		2.9928	3.00	
			2.3			
	8.49	2		2.9864	2.99	
			2.3			
	10.79	2		2.98	2.99	
			2.29			
21	13.08	2		2.974	2.98	
			2			
	15.08	2		2.9681	2.97	
			1.08			
profund1	16.16	2		2.784	2.79	Cuenco
			1.59			
profund2	17.75	2		2.784	2.79	Cuenco
			1.1			
27	18.85	2		2.96	2.97	Inicio Descarga
			1.91			
29	20.76	2		2.878	2.88	Fin canal C

TABLA N° 3.4 Descripción de abscisa y cotas para cortes de estructura metálica Fase C

FASE C1 - FASE ABC						
Estación	Abscisa (m)	Nº hierros	Distancia (m)	Cota fondo del canal (m)	Altura de hierro a cortar (m)	Descripción
23	15.8	2		2.966	2.97	Inicio Cuenco
			2.31			
60	18.11	2		2.784	2.79	Fase C1
			1.16			
61	19.27	2		2.784	2.79	
			3.10			
62	22.36	2		2.781	2.79	
			1.10			
64	23.46	2		2.779	2.79	
			0.68			
65	24.14	2		2.778	2.78	Inicio transición
			0.95			
66	25.09	2		2.584	2.59	Inico Cámara de Interconexión
			9.07			
67	30.99	2		2.184	2.19	vórtice de descarga

TABLA N° 3.5 Descripción de abscisa y cotas para cortes de estructura metálica Fase C1 y ABC

### 3.5.4 CONSTRUCCIÓN DE CANALES DE CIRCULACIÓN DEL FLUJO Y ESTRUCTURAS EN ACRÍLICO

Basándose en los planos modelo (ver anexos planos 2 y 3) se cortaron las planchas de acrílico para armar los canales de acuerdo a la geometría correspondiente. Para la elaboración de las curvaturas de los canales y los vertederos de descarga de la Fase AB y C, se calentaron las planchas de acrílico hasta alcanzar una temperatura de 120 grados centígrados para que sea factible ajustar la forma geométrica en moldes de madera fabricados previamente. Las planchas usadas fueron de 6mm de espesor para resistir la presión del agua.

Las tablas 3.6, 3.7 y 3.8, muestran el ancho y altura de acrílico correspondiente a cada abscisa y cada fase del modelo.

FASE AB								
Estación	Abscisa (m)	Longitud del fondo (m)	Arco (m)	Espesor acrílico (mm)	Cota fondo del canal (m)	Ancho canal (m)	Altura canal (m)	Descripción
30	0				3.089	0.25	0.3	
		0.4300		6				
38	0.43				3.089	0.25	0.3	
		0.8100		6				
43	1.24				3.071	0.25	0.3	Inicio Transición
		2.6510		6		variable: 0.25 a 0.3335		Transición
49	3.89				3	0.3335	0.3	Fin Transición
		4.0000		6				
50	7.89				2.988	0.3335	0.3	
		1.7400	1.74	4				
52	9.63				2.983	0.3335	0.3	
		0.9200		6				
53	10.55				2.98	0.3335	0.3	Inicio curvatura
		1.3100						
54	11.86				2.976	0.3335	0.3	Inicio Cuenco
		0.4200						
profund								
		1.3600						
56	13.6				2.788	0.3335	0.6	Fin curvatura
		0.0900		6				
profund								
		0.4100						
57	14.05				2.97	0.3335	0.6	Fin Cuenco
		3.3000		6				
58	17.35				2.96	0.3335	0.6	Inicio Descarga
		1.0400		6				
59	18.39				2.908	0.3335	0.6	Fin canal AB

TABLA N° 3.6 Descripción de ancho y altura de canales de acrílico Fase AB

FASE C								
Estación	Abscisa (m)	Longitud del fondo (m)	Arco (m)	Espesor acrílico (mm)	Cota fondo del canal (m)	Ancho canal (m)	Altura canal (m)	Descripción
3	0				3.089	0.25	0.3	
		0.43		6				
9	0.43				3.089	0.25	0.3	
		0.81	0.81	6				
15	1.24				3.071	0.25	0.3	Inicio Transición
		2.65		6		variable: 0.25 a 0.3335		Transición
20	3.89				3	0.3335	0.3	Fin Transición
		9.19		6				
21	13.08				2.974	0.3335	0.3	
		2.72	2.72	6				
23	15.8				2.966	0.3335	0.3	Inicio Quenco
		0.41						
profund								
		0.24		6				
24	16.4				2.784	0.3335	0.6	
		1.34						
profund								
		0.40	2.45	6				
26	18.1				2.962	0.3335	0.6	Fin cuenco
		0.75						
27	18.85				2.96	0.3335	0.6	Inicio Descarga
		0.90	0.9	6				
28	19.75				2.957	0.3335	0.6	Vertedero-descarga canal
		1.01		6				
29	20.76				2.878	0.3335	0.6	Fin canal C

TABLA N° 3.7 Descripción de ancho y altura de canales de acrílico Fase C

FASE C1 - FASE ABCN								
Estación	Abscisa (m)	Longitud del fondo (m)	Arco (m)	Espesor acrílico (mm)	Cota fondo del canal (m)	Ancho canal (m)	Altura canal (m)	Descripción
23	15.8				2.966	0.3335	0.6	Inicio Quenco
		2.3100		6				
60	18.11				2.784	0.3335	0.6	Fase C1
		1.1600		6				
61	19.27				2.784	0.35	0.6	Ver detalle de curvatura en la unión
		3.0900		6				
62	22.36				2.781	0.35	0.6	
		1.1000		6				
64	23.46				2.779	0.35	0.6	
		0.6800		6				
65	24.14				2.778	0.35	0.6	Iniciotransición
		0.9500		6		variable: 0.35 a 0.7		
66	25.09				2.584	0.7	0.8	Inico Cámara de Interconexión
		5.9239						
67	30.99			6	2.184	0.7	1.2	vórtice de descarga

TABLA N° 3.8 Descripción de ancho y altura de canales de acrílico Fase C1 y Fase ABC

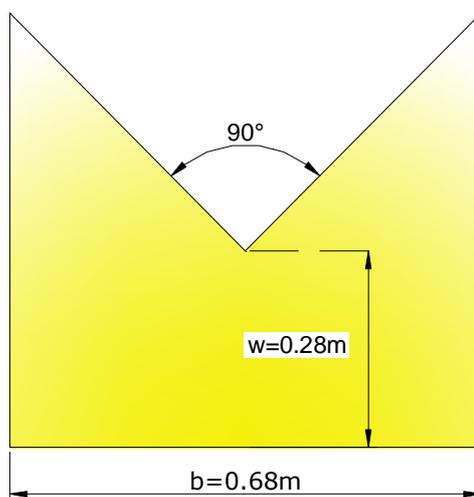
### 3.5.5 CONSTRUCCIÓN DE CANALES DE RESTITUCIÓN

Los canales de restitución fueron construidos con bloque de 40x20x15cm para conducir el agua desde el modelo de regreso al canal de recirculación del laboratorio. Se dio un acabado de enlucido y pintado a las paredes para evitar la filtración de agua.

### 3.5.6 CONSTRUCCIÓN DE VERTEDEROS Y ESTRUCTURAS EN MADERA

Todos los vertederos del modelo fueron construidos con madera triplex de 18mm de espesor. La madera utilizada fue tratada para resistir el agua con sellador y pintura esmalte.

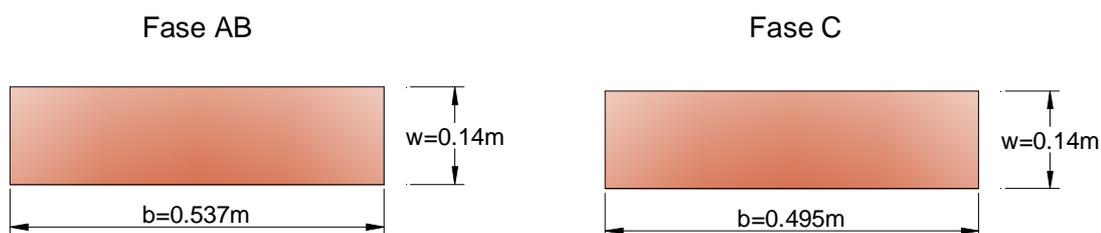
Los vertederos utilizados para medir los caudales en las entradas de cada unidad son triangulares con un ángulo de destaje de  $45^\circ$  y 2mm de espesor. Estas estructuras de aforo tienen las siguientes dimensiones: 68cm de ancho (b), 28cm de alto (w) y ángulo de  $90^\circ$ .



Para medir la descarga en la fase AB y C se usaron vertederos rectangulares con un ángulo de destaje de  $45^\circ$  y 2mm de espesor. Estos vertederos tienen las siguientes dimensiones:

Fase AB: 53.7 cm de ancho y 14 cm de altura

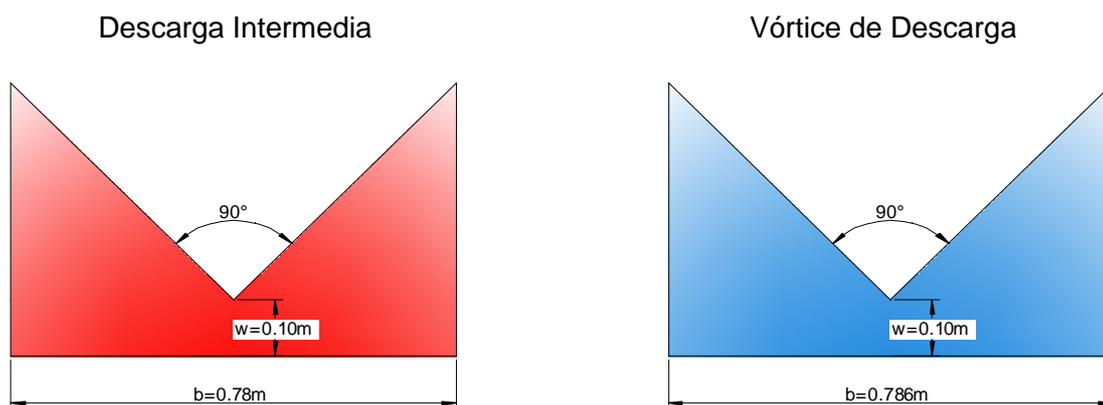
Fase C: 49.5 cm de ancho y 14 cm de altura



A la salida de la cámara de interconexión tanto en la descarga intermedia como en el vórtice, se usaron vertederos triangulares con un ángulo de destaje de  $45^\circ$  y 2mm de espesor. Estas estructuras tienen las siguientes dimensiones:

Descarga Intermedia: 78 cm de ancho (b), 10 cm de alto y ángulo de  $90^\circ$ .

Vórtice de descarga: 78.6 cm de ancho (b), 10 cm de alto y ángulo de  $90^\circ$ .



### 3.6 CONCLUSIONES

La selección de la escala adecuada se la realizó escogiendo el modelo de mayor tamaño que pueda ser construido en el laboratorio, considerando las disponibilidades físicas de espacio, de caudales y de carga hidráulica al inicio del modelo. La escala 1:20 fue la seleccionada.

Para la implantación del modelo se revisó el área y altura disponible en el laboratorio. Se reconoce que el área total requerida para el estudio experimental puede ser construida en el área cubierta del laboratorio. Se seleccionó el sitio de implantación del modelo y se realizó el replanteo correspondiente.

La construcción del modelo debe ser realizada con precisión, puesto que al ser una estructura a reducida escala, un pequeño error constructivo puede modificar el comportamiento hidráulico del modelo.

## CAPÍTULO 4

### CALIBRACIÓN DEL MODELO

#### 4.1 BASES PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO CON FLUJO VARIADO PERMANENTE

El objetivo principal de la calibración es establecer que el modelo sea geométrica y dinámicamente semejante al prototipo, es decir, las magnitudes físicas referentes a puntos homólogos estén en relaciones fijas y acordes<sup>1</sup>.

En la fase de calibración del modelo en función de los caudales característicos se comparan los valores de los calados y velocidades, con sus correspondientes a los del prototipo calculados, de tal manera que:

Para un caudal constante:

a) Velocidad modelo medida	<	Velocidad prototipo calculada	El modelo es mas rugoso que el prototipo
Calados modelo medidos	>	Calados prototipo calculado	
b) Velocidad modelo medida	>	Velocidad prototipo calculada	El modelo es mas liso que el prototipo
Calados modelo medidos	<	Calados prototipo calculado	

TABLA N° 4.1 Comparación de calados y velocidades medidos en modelo y prototipo<sup>1</sup>

Las situaciones a) y b) obligan a corregir la rugosidad del modelo. De lo expuesto en el Capítulo 2, se establece que el acrílico es un material adecuado para la simulación física del prototipo.

La calibración del modelo incluye además la calibración de los instrumentos de medición construidos para el control de los caudales de entrada y salida (en este caso vertederos), así como también la similitud de los datos obtenidos en laboratorio con aquellos medidos en campo.

<sup>1</sup> Hidalgo Marcelo. (2007). Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas.

Es recomendable complementar la calibración realizando análisis y verificaciones adicionales para establecer que el modelo sea en lo posible dinámicamente semejante al prototipo.

## 4.2 PLAN DEFINITIVO DE PRUEBAS DE CALIBRACIÓN

### 4.2.1 CALIBRACIÓN DE LOS VERTEDEROS DE CONTROL DE CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA AL MODELO

#### 4.2.1.1 Calibración Vertederos de Entrada

Para regular el caudal de entrada al modelo se utilizaron vertederos triangulares de 90°. La curva de calibración para dichos vertederos se obtuvo realizando pruebas para una gama de caudales, midiendo la carga sobre el vertedero “ $h_v$ ”. Conocido el valor de  $h$  se determinó el caudal correspondiente con la fórmula teórica para vertederos triangulares (fórmula de Hégly <sup>2</sup>)

$$Q = Cd * h_v^{5/2} \quad (4.1)$$

$$C = \left[ 1.3733 + \left( \frac{0.0088}{h_v} \right) * \left( 1 + \frac{h_v^4}{b_v^2 [h_v + w]^2} \right) \right] \quad \begin{matrix} \theta = 90^\circ \\ 0.05 \leq h_v \leq 0.25m \end{matrix} \quad (4.2)$$

Donde:

$Q$  = Caudal ( $m^3/s$ )

$C$  = Coeficiente de descarga del vertedero

$h_v$  = Carga sobre el vertedero (m)

$b_v$  = Ancho del vertedero (m)

$w$  = Altura al vértice del vertedero (m)

Se ensayarán caudales dentro del rango de operación normal de cada turbina ( $1m^3/s$  a  $20m^3/s$  prototipo). Con estos datos se considera lograr una adecuada calibración de los vertederos.

<sup>2</sup> Castro Marco. SEPARATAS, Sobre el uso de las diferentes fórmulas para coeficientes de descarga de vertederos de medida.

Como prueba complementaria y de validación de la calibración de los vertederos de entrada, se escogió de manera arbitraria el vertedero de la unidad 4 de la fase AB, para comparar valores obtenidos de una medición volumétrica de caudal con aquellos que se obtuvieron de la ecuación de la curva de descarga correspondiente.

#### **4.2.1.2 Calibración Vertederos de Salida**

##### *4.2.1.2.1 Calibración de los vertederos de descarga de las Fases AB y C*

En la descarga de las fases AB y C se usarán vertederos rectangulares para la medición del flujo. Las curvas de descarga de estos vertederos se las obtendrá calibrando cada fase independientemente.

Establecido el caudal de entrada a través de la suma de los caudales individuales provenientes de las cinco unidades de cada fase, determinados con los vertederos triangulares de entrada previamente calibrados; se medirá la carga de agua sobre los vertederos rectangulares de ambas fases para una serie de caudales: 20, 40, 60, 80 y 100 m<sup>3</sup>/s (caudales prototipo), obteniendo la curva de calibración Q vs h.

##### *4.2.1.2.2 Calibración del vertedero de la Cámara de Interconexión*

A la salida de la tubería de descarga de la Cámara de Interconexión se colocará un vertedero triangular de 90° para la medición del caudal de ingreso a la Central Sopladora. Se ensayarán caudales hasta 150 m<sup>3</sup>/s prototipo, valor máximo de operación de dicha central. A cada caudal le corresponde una lectura de carga sobre el vertedero, resultando una curva de descarga característica para esta estructura.

#### *4.2.1.2.3 Calibración del vertedero de descarga intermedia*

Para la calibración del vertedero triangular conocido como descarga intermedia, ubicado a la salida de la cámara de interconexión, se cerrará la fase C1 y la válvula de compuerta que controla el ingreso de flujo a la tubería de descarga de la central Sopladora. El caudal de ingreso será enviado únicamente por la fase AB pasando directamente a la fase ABC y a la Cámara de interconexión, para ser aliviado por el vertedero de descarga intermedia.

La determinación de la curva de calibración del vertedero triangular de descarga intermedia, se efectuará de igual manera que para los vertederos anteriores. Conocidos los caudales de ingreso por la fase AB y la carga de agua sobre dicho vertedero, se determinará su curva de calibración. La gama de caudales prototipo probados estará dentro de un rango de 0 a 100 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.2.2 CALIBRACIÓN DE CALADOS MODELO - PROTOTIPO**

Para completar y validar la calibración del modelo, se comparará los valores de los calados medidos en laboratorio, con sus correspondientes a los del prototipo calculados con el programa computacional Hec-Ras.

Además, se determinarán en modelo los niveles libres de agua correspondientes a una gama de caudales, en cada una de las fases (AB y C), trabajando estas independientemente. Los valores obtenidos serán comparados con aquellos registrados en campo por el consultor.

#### **4.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS DE CALIBRACIÓN Y/O DE VALIDACIÓN DEL MODELO FÍSICO**

En la etapa de calibración de las fases AB y C del modelo se observó la presencia de flujo subcrítico a lo largo de los canales hasta la llegada a la descarga ( $0.11 \leq Fr \leq 0.43$ ). Dicha condición de flujo es adecuada para el funcionamiento óptimo de las obras hidráulicas. Además, al presentarse el flujo tranquilo, con

velocidades bajas ( $0.17\text{m/s} \leq V \leq 0.77\text{m/s}$  prototipo), se controla el proceso de socavación en las estructuras.

Se observó que la altura de la superficie libre de agua en modelo alcanzaba niveles similares a los registrados en prototipo. Adicionalmente, comparando los calados medidos en laboratorio con los calados obtenidos mediante modelación numérica, se confirmó la correcta calibración modelo-prototipo, puesto que, este registro de datos también era semejante.

De igual manera se comprobó que los caudales de entrada al modelo medidos de acuerdo a las ecuaciones obtenidas en la calibración de los vertederos, eran iguales a los caudales de salida, validando dichas ecuaciones.

Con lo expuesto en los párrafos anteriores, se concluye que la calibración del modelo físico es correcta.

## **4.4 PRESENTACIÓN BÁSICA DE LOS RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO**

### **4.4.1 VERTEDEROS DE CONTROL DE CAUDALES DE ENTRADA Y SALIDA AL MODELO**

#### **4.4.1.1 Vertederos de Entrada**

Para el caso de los vertederos triangulares que miden el caudal de ingreso a la Fase AB, la curva de descarga adoptada para los vertederos de las unidades 1 y 2 es la misma, debido a que el coeficiente individual resultante es igual. Para las unidades 3, 4, y 5 se adopta otra curva de calibración con un distinto coeficiente. El gráfico 4.1 muestra la curva de descarga para las unidades 1 y 2 y el gráfico 4.2 la curva de descarga de las unidades 3, 4, y 5. Los valores registrados y cálculos realizados para la calibración de los vertederos de entrada de la Fase AB se detallan en el anexo 1.1 de tablas y gráficos.

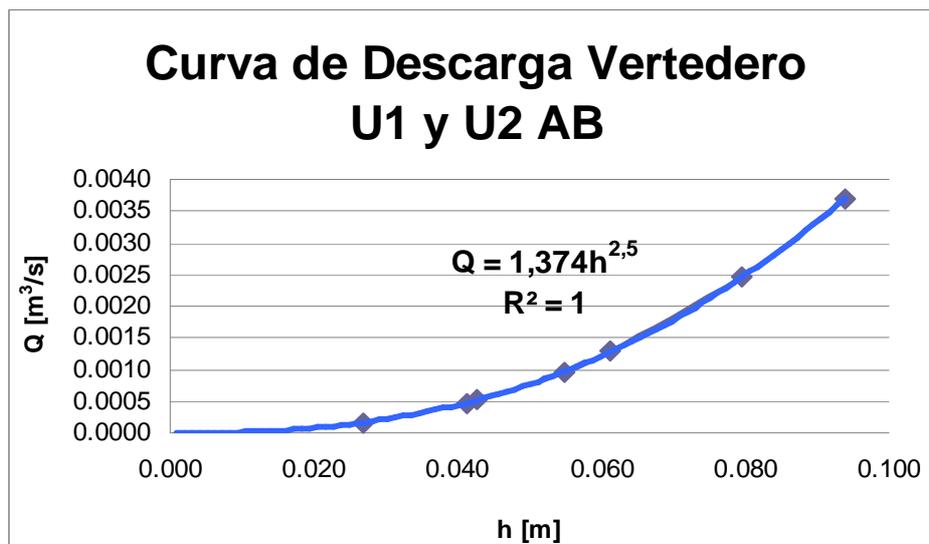


GRÁFICO N° 4.1 Curva de descarga vertederos triangulares de las unidades 1 y 2 - Fase AB

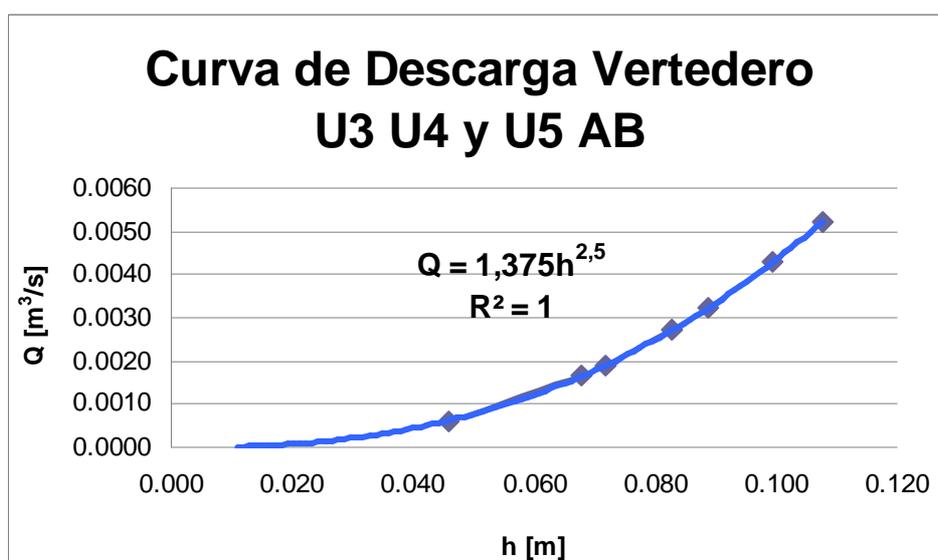


GRÁFICO N° 4.2 Curva de descarga vertederos triangulares de las unidades 3, 4 y 5 - Fase AB

En el caso de los vertederos triangulares que miden el caudal de ingreso de la Fase C, se tienen tres curvas de descarga, una para el vertedero de la unidad 6 (gráfico 4.3), otra para los vertederos de las unidades 7 y 8 (gráfico 4.4), mientras que los vertederos de las unidades 9 y 10 registran un coeficiente diferente, por lo tanto les corresponde otra curva de descarga (gráfico 4.5). Las mediciones obtenidas en laboratorio y los cálculos realizados para la calibración de los vertederos de entrada de la Fase C se indican en el anexo 1.2 de tablas y gráficos.

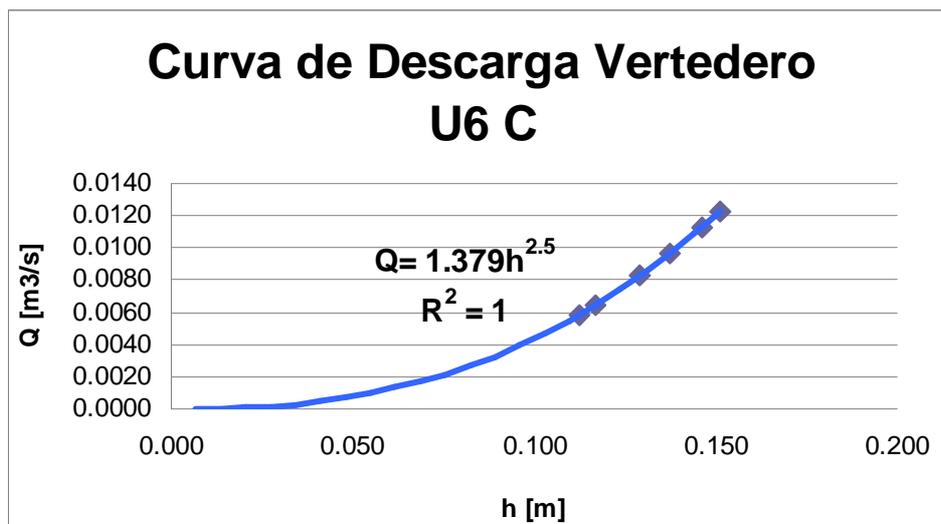


GRÁFICO N° 4.3 Curva de descarga vertederos triangular de la unidad 6 - Fase C

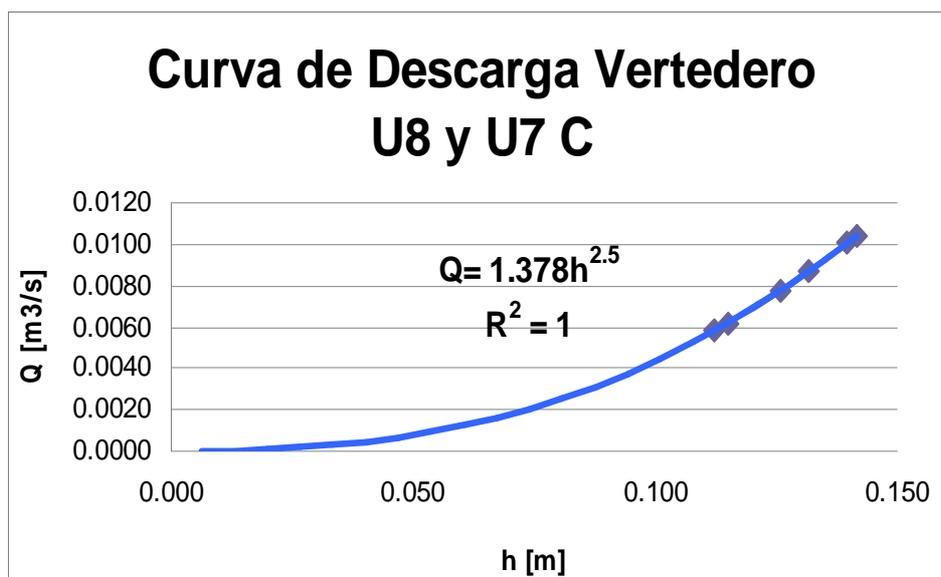


GRÁFICO N° 4.4 Curva de descarga vertederos triangulares de las unidades 7 y 8 - Fase C

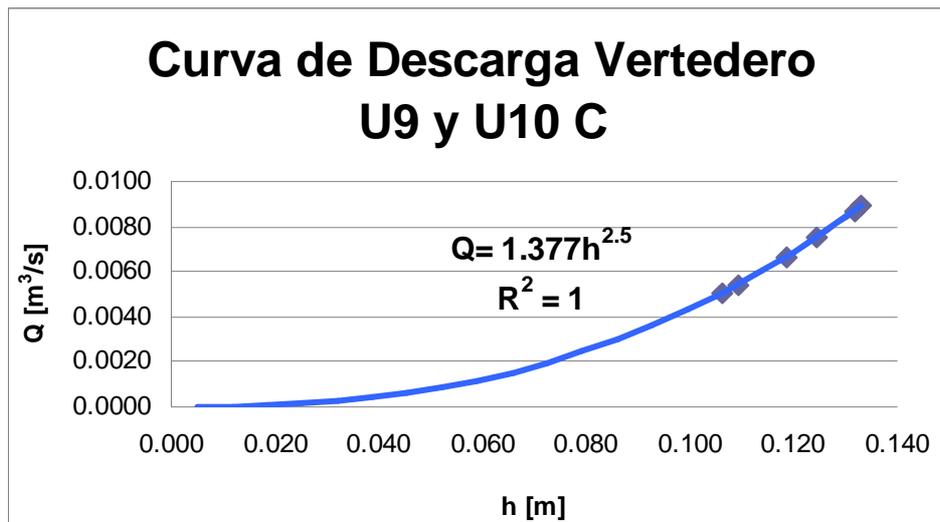


GRÁFICO N° 4.5 Curva de descarga vertederos triangulares de las unidades 9 y 10 - Fase C

Los resultados del ensayo complementario y de validación de la calibración de los vertederos de entrada, en donde se compara el caudal obtenido con la ecuación de calibración de un vertedero de la Fase AB con el caudal medido por un método volumétrico, se presentan en la siguiente tabla. La última columna muestra la diferencia de caudal medido existente entre los dos métodos.

<b>Qvert (l/s)</b>	<b>Qvolum (l/s)</b>	<b>Qv-Qvt (l/s)</b>
1,87	1,96	-0,09
9,76	9,73	0,02
7,84	7,71	0,13
9,17	9,08	0,09
9,83	9,88	-0,06

TABLA N° 4.2 Comparación caudales volumétricos vs caudales ecuación del vertedero - Unidad 4 fase AB

Los resultados obtenidos en la tabla 4.2 ratifican la correcta calibración de los vertederos triangulares de entrada al modelo.

#### 4.4.1.2 Vertederos de Salida

Las curvas de descarga de los vertederos de aforo de los caudales de salida, se presentan en los gráficos 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 con su respectiva ecuación. Los

datos y cálculos para la obtención de estas ecuaciones se muestran en los anexos 2, 3, 4 y 5 de tablas y gráficos.

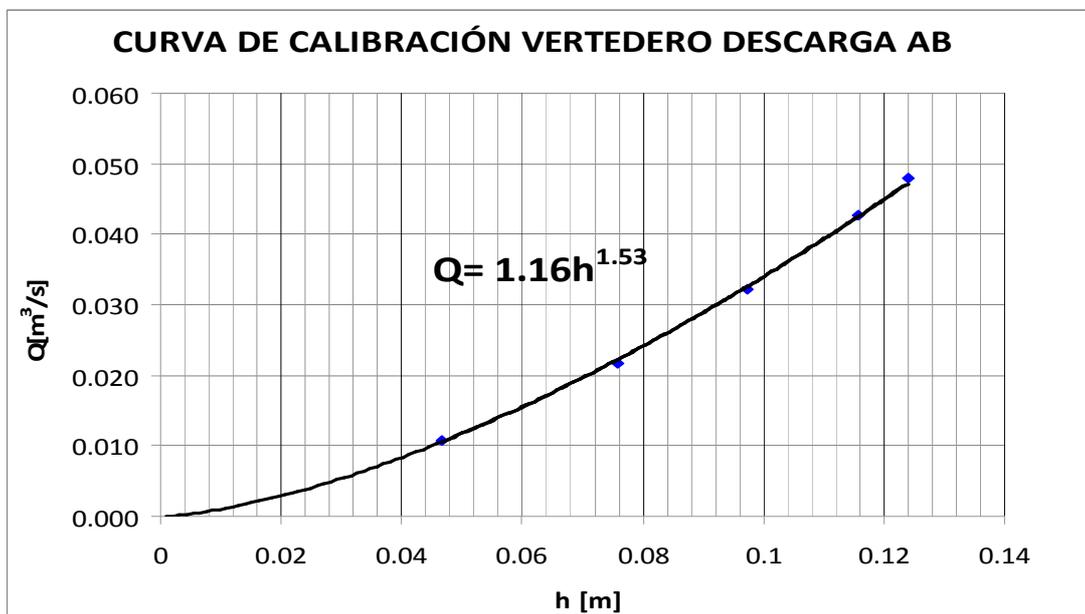


GRÁFICO N° 4.6 Curva de Descarga vertedero rectangular Fase AB

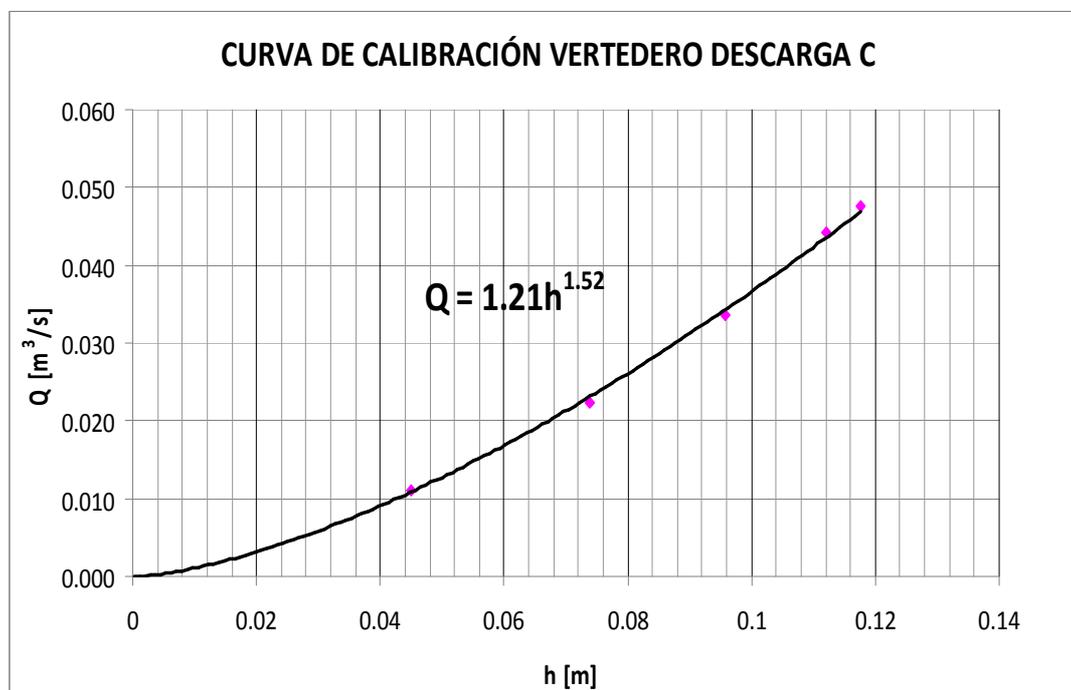


GRÁFICO N° 4.7 Curva de Descarga vertedero rectangular Fase C

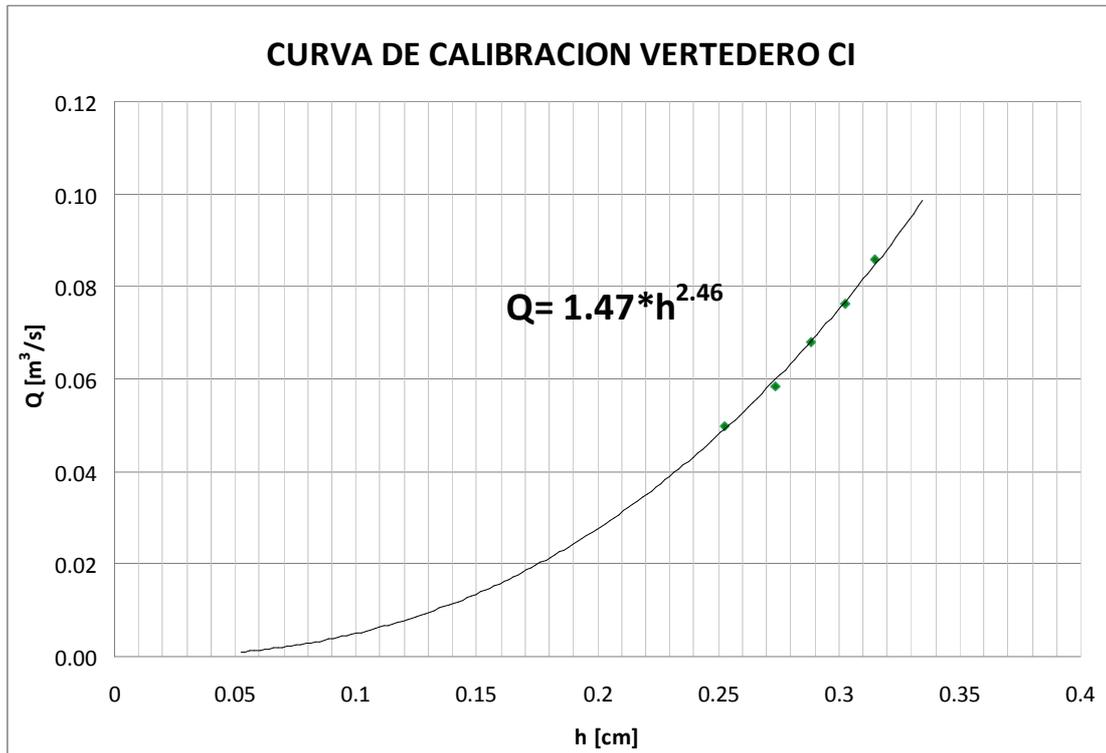


GRÁFICO N° 4.8 Curva de Descarga vertedero triangular Cámara de Interconexión

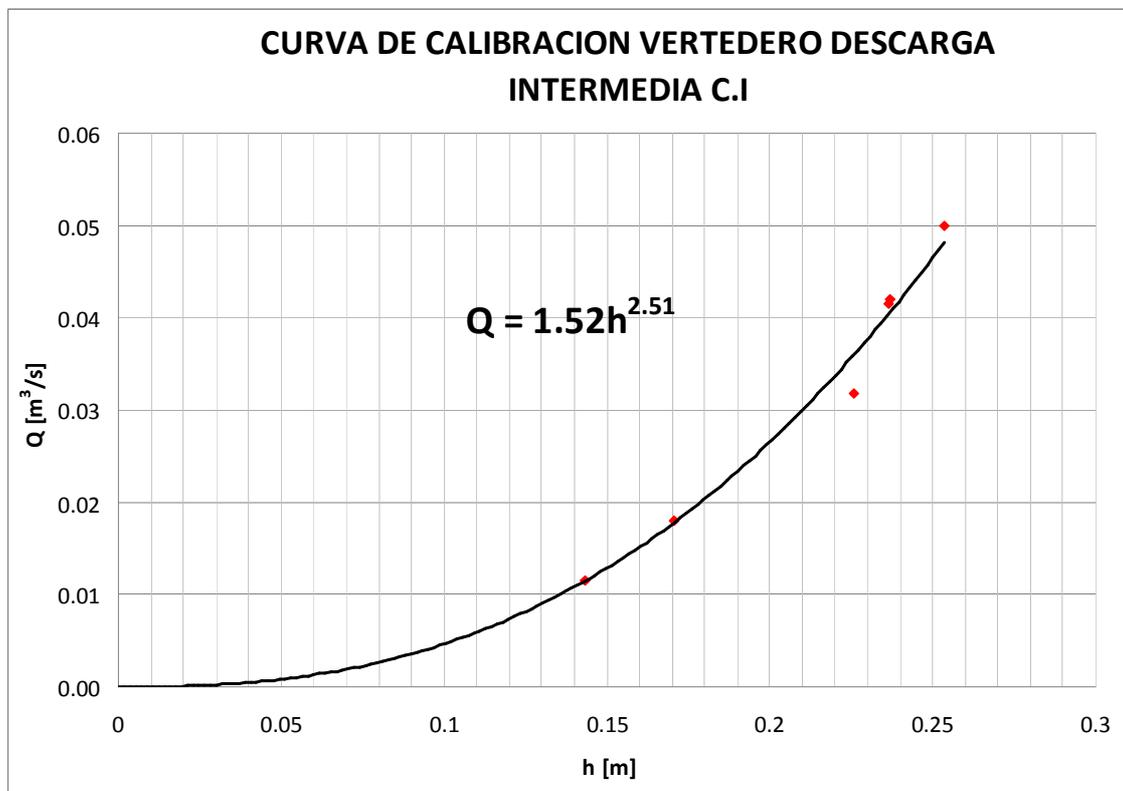


GRÁFICO N° 4.9 Curva de Descarga vertedero triangular Descarga Intermedia

Como complemento final de esta etapa, con los datos obtenidos en laboratorio, se realizó la curva de calibración de los vertederos de descarga existentes en la fase AB y C, obteniendo las curvas mostradas en los gráficos 4.10 y 4.11. Los datos y cálculos mediante los cuales se obtuvo estas curvas de calibración se presentan en los anexo 6 de tablas y gráficos.

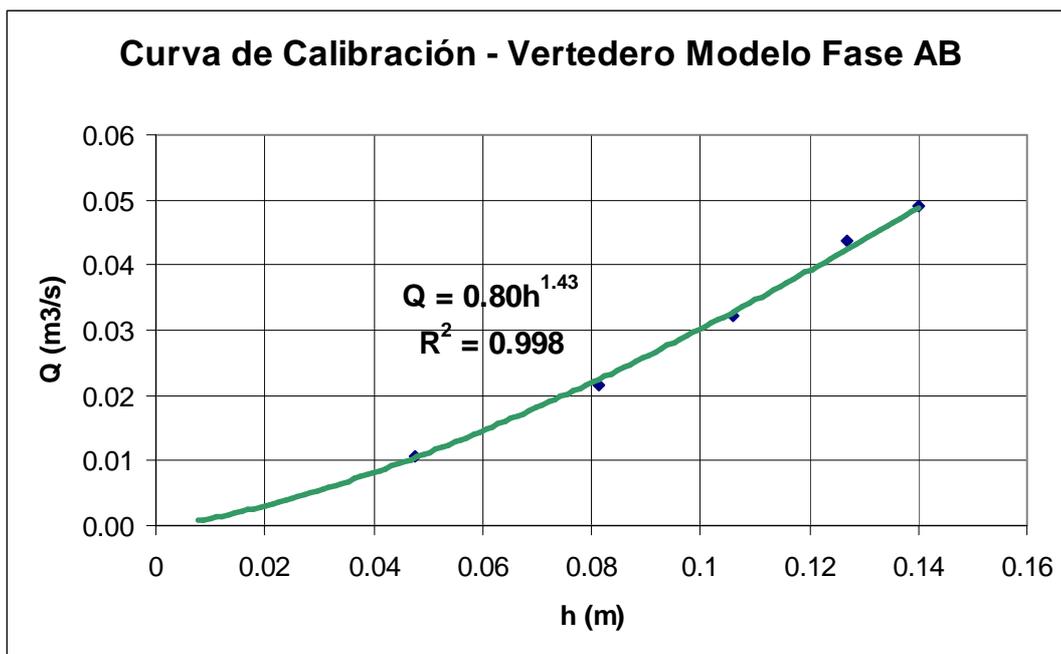


GRÁFICO N° 4.10 Curva de Descarga Vertedero Fase AB

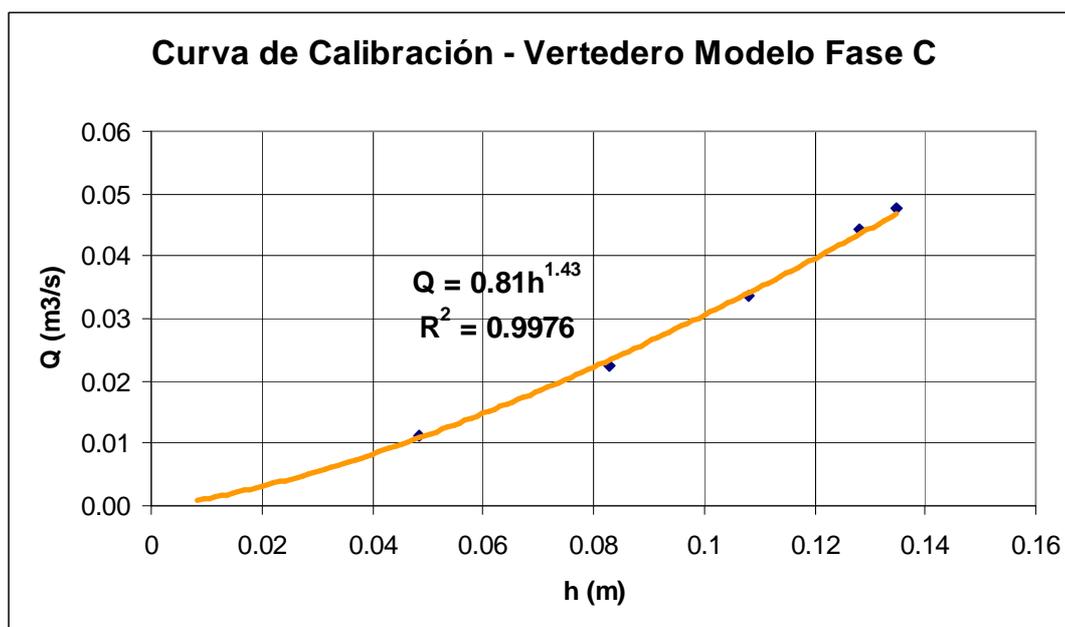


GRÁFICO N° 4.11 Curva de Descarga Vertedero Fase AB

De los gráficos 4.10 y 4.11 se obtiene las ecuaciones generales para los vertederos de descarga de las fases AB y C.

$$Q = C_d * b_v * h_v^n \quad (5)$$

Donde:

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/s)

C<sub>d</sub> = Coeficiente de descarga del vertedero

b<sub>v</sub> = Ancho del vertedero (m)

h<sub>v</sub> = Carga sobre el vertedero (m)

n = Exponente de la carga sobre el vertedero

Tanto para la fase AB como para la fase C el vertedero de descarga presenta la siguiente ecuación:  $Q = 2.4 * b_v * h_v^{1.43}$ . Coeficientes que se justifican puesto que se acercan mucho a los valores teóricos establecidos para vertederos similares ( $2 < C_d < 2.4$  y  $n = 1.5$ ).<sup>3</sup>

## 4.4.2 COMPARACIÓN CALADOS MODELO - PROTOTIPO

### 4.4.2.1 Calados Modelo vs Calados Prototipo – Campo

Una vez obtenidas las curvas de descarga de cada uno de los vertederos, se procedió a comparar los valores de calados obtenidos en modelo vs calados medidos en campo para las fases AB y C. El registro de datos en laboratorio se realizó en la etapa de calibración de las fases AB y C, funcionando independientemente, tal como trabajan en la actualidad. Mientras que los calados prototipo que entregaron los consultores, fueron de medidas realizadas en campo.

A continuación se presenta los resultados de la comparación, para cada una de las fases.

---

<sup>3</sup> Sotelo Gilberto. HIDRAULICA GENERAL/ Volumen 1 – Fundamentos: Limusa

### Fase AB

La tabla 4.3 muestra los valores, tanto de caudal como de cota de nivel libre de agua de mediciones en campo en la descarga, entregados por los consultores, mientras que la tabla 4.4 es el registro correspondiente a las mediciones realizadas en la descarga del modelo construido en laboratorio.

Q CGM m <sup>3</sup> /s	Calado Prototipo m	Cota Prototipo msnm
23.31	4.56	1316.86
40.08	4.83	1317.13
55.66	5.24	1317.54
70.57	5.83	1318.13

TABLA N° 4.3 Caudales y calados en la descarga medidos en campo Fase AB

Q modelo l/s	Calado Modelo cm	Q prototipo m <sup>3</sup> /s	Calado Prototipo m	Cota Prototipo msnm
10.73	20.37	19.19	4.074	1316.374
21.62	23.72	38.68	4.744	1317.044
32.18	26.2	57.56	5.24	1317.54
43.66	28.3	78.11	5.66	1317.96

TABLA N° 4.4 Caudales y calados en la descarga medidos en laboratorio y transformados a prototipo Fase AB

Los resultados obtenidos se expresan en la tabla 4.5, donde se observa la semejanza de los valores de cotas de la superficie de agua entre prototipo y modelo en la descarga para valores similares de caudal.

Q CGM prototipo m <sup>3</sup> /s	Cota Prototipo msnm	Q modelo transform protot m <sup>3</sup> /s	Cota Prototipo msnm	Diferencia Q m <sup>3</sup> /s	Diferencia Cota msnm
23.31	1316.86	19.19	1316.374	4.12	0.486
40.08	1317.13	38.68	1317.044	1.40	0.086
55.66	1317.54	57.56	1317.54	-1.90	0
70.57	1318.13	78.11	1317.96	-7.54	0.17

TABLA N° 4.5 Comparación Calados en la Descarga: Prototipo – Campo vs Modelo. Fase AB

La tabla 4.6 muestra el registro de datos de calados medidos en campo entregados por los consultores, en los fosos de las unidades funcionando las cinco turbinas de la fase AB de Molino con un caudal de 70.57m<sup>3</sup>/s. Mientras que las tablas 4.7 y 4.8 corresponden a las mediciones realizadas en las unidades del

modelo construido en laboratorio, ingresando un caudal total de  $78.11\text{m}^3/\text{s}$  por las unidades 1,2, 4 y 5.

Caudal CGM - Fase AB		
Q total = 70.57 $\text{m}^3/\text{s}$		
Unidad	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Cota (msnm)
Unidad 1	14.15	1318.53
Unidad 2	14.05	1318.62
Unidad 3	13.72	1318.74
Unidad 4	14.26	1318.82
Unidad 5	14.56	1318.9

TABLA N° 4.6 Calados medidos en campo en los fosos de las unidades para un caudal total de  $70.57\text{m}^3/\text{s}$   
Fase AB

CAUDAL FASE AB : $78.11\text{m}^3/\text{s}$		
Unidades	Q modelo (l/s)	Q prototipo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
Unidad 1	11.04	19.75
Unidad 2	11.17	19.98
Unidad 3	0.00	0.00
Unidad 4	10.61	18.99
Unidad 5	10.84	19.39

TABLA N° 4.7 Caudales medidos en laboratorio Fase AB

CALADO FASE AB PARA Q = $78.11\text{m}^3/\text{s}$			
Unidades	Calado modelo (cm)	Calado prototipo (m)	Cota prototipo (m.s.n.m)
Unidad 1	17.00	3.40	1318.40
Unidad 2	17.50	3.50	1318.50
Unidad 3	17.00	3.40	1318.40
Unidad 4	17.30	3.46	1318.46
Unidad 5	17.10	3.42	1318.42

TABLA N° 4.8 Calados en los fosos de las unidades medidos en laboratorio Fase AB para los caudales de la tabla 4.7

Los valores de cotas correspondientes a los niveles en los fosos de las unidades registrados en las tablas 4.6 y 4.8 medidos en prototipo y modelo muestran gran similitud, siendo la mayor diferencia entre cotas  $0.48\text{m}$  prototipo equivalentes a  $2.4\text{cm}$  en modelo. Esta diferencia es aceptable puesto que la comparación modelo-prototipo, no se realizó en las mismas condiciones de ingreso de caudal por las unidades, ni con los mismos valores de caudal.

### Fase C

Se procedió a comparar los valores de calados para diferentes caudales registrados en el modelo (tabla 4.9) con los datos entregados por los consultores de mediciones en campo (tabla 4.10), obteniendo los siguientes resultados.

Q CGM m <sup>3</sup> /s	Calado Prototipo m	Cota Prototipo msnm
26.93	4.45	1316.9
51.82	5.12	1317.57
96.81	6.12	1318.57

TABLA N° 4.9 Caudales y calados en la descarga medidos en campo Fase C

Q modelo l/s	Calado Modelo cm	Q prototipo m <sup>3</sup> /s	Calado Prototipo m	Cota Prototipo msnm
11.10	20.79	19.86	4.158	1316.61
33.58	26.76	60.07	5.352	1317.80
47.64	29.43	85.22	5.886	1318.34

TABLA N° 4.10 Caudales y calados en la descarga medidos en laboratorio y transformados a prototipo en la Fase C

Q CGM prototipo m <sup>3</sup> /s	Cota Prototipo msnm	Q modelo transformado prototipo m <sup>3</sup> /s	Cota Prototipo msnm	Diferencia Q m <sup>3</sup> /s	Diferencia Cota msnm
26.93	1316.9	19.86	1316.608	7.07	0.292
51.82	1317.57	60.07	1317.802	-8.25	-0.232
96.81	1318.57	85.22	1318.336	11.59	0.234

TABLA N° 4.11 Comparación Calados Prototipo – Campo vs Modelo. Fase C

De igual manera que para la Fase AB, analizando la tabla 4.11, se determinó que en la fase C, aunque los valores de caudales comparados no son similares, las cotas correspondientes a los niveles de agua registrados en modelo son cercanos a los de prototipo.

La tabla 4.12 muestra los datos de campo entregados por los consultores para el caudal máximo medido (96.81m<sup>3</sup>/s) y los niveles en los fosos de las unidades, funcionando las cinco turbinas de la fase C de Molino, mientras que las tablas 4.13 y 4.14 corresponden a mediciones de caudales y calados realizadas en las unidades del modelo construido en laboratorio para un caudal de 100.12 m<sup>3</sup>/s.

Caudal CGM - Fase C		
Q total = 96.81 m <sup>3</sup> /s		
Unidad	Q (m <sup>3</sup> /s)	Cota (msnm)
Unidad 6	19.43	1319.49
Unidad 7	19.42	1319.59
Unidad 8	19.36	1320.17
Unidad 9	19.04	1319.79
Unidad 10	19.33	1319.84

TABLA N° 4.12 Calados medidos en campo en los fosos de las unidades para un caudal total de 96.81 m<sup>3</sup>/s  
Fase C

CAUDAL MÁXIMO FASE C		
Unidades	Q modelo (l/s)	Q prototipo (m <sup>3</sup> /s)
Unidad 6	10.89	19.48
Unidad 7	10.88	19.46
Unidad 8	11.40	20.39
Unidad 9	10.33	18.49
Unidad 10	11.23	20.10

TABLA N° 4.13 Caudales medidos en laboratorio en los fosos de las unidades para un caudal total de 100.12 m<sup>3</sup>/s. Fase C

CALADO MÁXIMO FASE C			
Unidades	Calado modelo (cm)	Calado prototipo (m)	Cota prototipo (m.s.n.m)
Unidad 6	28.00	5.60	1320.60
Unidad 7	27.60	5.52	1320.52
Unidad 8	27.00	5.40	1320.40
Unidad 9	26.90	5.38	1320.38
Unidad 10	25.90	5.18	1320.18

TABLA N° 4.14 Calados en los fosos de las unidades medidos en laboratorio Fase C para los caudales registrados en la tabla 20

Los valores de cotas correspondientes a los niveles en los fosos de las unidades registrados en las tablas 4.12 y 4.14; medidos en prototipo y modelo, muestran cierta similitud, siendo la mayor diferencia entre cotas 1.1m prototipo equivalentes a 5.5cm en modelo. Esta diferencia es tolerable puesto que la comparación modelo - prototipo, no se realizó en las mismas condiciones de ingreso de caudal por las unidades, ni con los mismos valores de caudal.

#### 4.4.2.2 Calados Modelo vs Calados Prototipo – Hec-Rass

Adicionalmente, en esta etapa se realizó una comparación de los valores de calados medidos en laboratorio con aquellos valores dados por el programa

computacional Hec-Ras, utilizando la geometría del modelo (ver anexos corridas Hec-Ras)

La tabla 4.15 muestra los resultados de esta comparación para la Fase AB:

No	Q (L/seg)	Sección	Sección Prototipo	LABORATORIO	HEC-RAS MODELO			Diferencia (cm)
				Calado (cm)	Cota Fondo (m)	Cota Superficie (m)	Calado (cm)	
1	10,73	14.45	281.56	17,05	3	3,167	16,7	0,35
		12.95	251.56	17,85	2,996	3,167	17,1	0,75
		11.45	191.56	18	2,992	3,167	17,5	0,5
		9.95	161.56	18,05	2,987	3,167	18	0,05
		8.45	158.56	19,1	2,983	3,167	18,4	0,7
		6.95	120.93	19,55	2,98	3,167	18,7	0,85
		6.23	47.19	19,75	2,978	3,167	18,9	0,85
		2.543	17.19	19,5	2,966	3,167	20,1	0,6
		1.043	12.33	20,25	2,963	3,167	20,4	0,15
2	21,62	14.45	281.56	20,3	3	3,209	20,9	0,6
		12.95	251.56	21	2,996	3,209	21,3	0,3
		11.45	191.56	21,1	2,992	3,209	21,7	0,6
		9.95	161.56	21,1	2,987	3,209	22,2	1,1
		8.45	158.56	22,2	2,983	3,209	22,6	0,4
		6.95	120.93	22,6	2,98	3,209	22,9	0,3
		6.23	47.19	22,7	2,978	3,209	23,1	0,4
		2.543	17.19	22,8	2,966	3,208	24,2	1,4
		1.043	12.33	23,6	2,963	3,208	24,5	0,9
3	32,18	14.45	281.56	22,3	3	3,229	22,9	0,6
		12.95	251.56	23,6	2,996	3,228	23,2	0,4
		11.45	191.56	23,8	2,992	3,228	23,6	0,2
		9.95	161.56	23,8	2,987	3,228	24,1	0,3
		8.45	158.56	24,8	2,983	3,228	24,5	0,3
		6.95	120.93	25,2	2,98	3,227	24,7	0,5
		6.23	47.19	25,2	2,978	3,227	24,9	0,3
		2.543	17.19	25,3	2,966	3,227	26,1	0,8
		1.043	12.33	25,8	2,963	3,227	26,4	0,6
4	42,66	14.45	281.56	25,1	3	3,254	25,4	0,3
		12.95	251.56	26,1	2,996	3,254	25,8	0,3
		11.45	191.56	26,1	2,992	3,253	26,1	1,1E-14
		9.95	161.56	26,1	2,987	3,253	26,6	0,5
		8.45	158.56	27,2	2,983	3,253	27	0,2
		6.95	120.93	27,3	2,98	3,252	27,2	0,1
		6.23	47.19	27,5	2,978	3,252	27,4	0,1
		2.543	17.19	27,2	2,966	3,251	28,5	1,3
		1.043	12.33	27,7	2,963	3,251	28,8	1,1
5	48,00	14.45	281.56	26,9	3	3,265	26,5	0,4
		12.95	251.56	27,5	2,996	3,264	26,8	0,7
		11.45	191.56	27,4	2,992	3,264	27,2	0,2
		9.95	161.56	27,7	2,987	3,263	27,6	0,1
		8.45	158.56	27,9	2,983	3,263	28	0,1
		6.95	120.93	28,7	2,98	3,262	28,2	0,5
		6.23	47.19	28,9	2,978	3,262	28,4	0,5
		2.543	17.19	28,6	2,966	3,261	29,5	0,9
		1.043	12.33	29,6	2,963	3,261	29,8	0,2

TABLA N° 4.15 Comparación modelo vs Hec-Ras Fase AB

De la tabla anterior se puede observar que no existe mayor diferencia entre los valores de calados medidos en laboratorio y los calculados por el programa Hec-Ras. La mayor diferencia entre ambos es 1.4cm (28cm prototipo) y la diferencia promedio es de 5mm de diferencia total (10cm prototipo). Se considera que estos valores son tolerables, debido a los errores que se pueden cometer al momento de realizar las mediciones en modelo y a la precisión de los instrumentos de medición usados.

#### **4.5 CONCLUSIONES**

Al comparar el coeficiente de rugosidad en modelo y prototipo, los valores obtenidos fueron similares garantizando la condición principal para la calibración del modelo.

Los vertederos triangulares de entrada al modelo fueron calibrados utilizando ecuaciones teóricas conocidas. En base a esta calibración se estableció las curvas de descarga de los vertederos de salida. Los resultados obtenidos fueron los esperados, siendo los valores de coeficientes y exponentes de las ecuaciones de calibración de cada uno de los vertederos rectangulares y triangulares semejantes a los valores teóricos.

Para establecer que el modelo sea en lo posible semejante al prototipo, se comparó los datos de calados obtenidos en laboratorio con los medidos en campo. La diferencia obtenida fue de alrededor de 2.5cm en modelo equivalentes a 50cm prototipo. Se considera estos valores admisibles tomando en cuenta que los caudales modelo no correspondían exactamente a los del prototipo.

Como una prueba complementaria a la calibración se comparó los calados medidos en laboratorio con los calados obtenidos mediante modelación numérica con el programa Hec-Ras. También se obtuvo resultados aceptables (5mm de diferencia en modelo correspondientes a 10cm en prototipo).

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL**

#### **5.1 OBJETIVOS DE LAS PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL**

Para conducir el caudal proveniente de la Central Molino a la Central Sopladora, la empresa consultora CGM plantea el diseño original para las obras de interconexión. El diseño consiste en conducir el caudal descargado de Molino a través de los túneles de las Fases AB y C hasta un túnel de recolección denominado Fase ABC de pendiente 0.115%. Este túnel empata con una cámara de interconexión que funciona como un embalse para proporcionar la carga de agua suficiente para la generación de energía hidroeléctrica en Sopladora. (Ver anexo planos 2 y 3).

El objetivo principal de realizar pruebas en el modelo físico con el diseño original es verificar el funcionamiento hidráulico de las obras.

La modelación física permite estudiar el flujo en forma tridimensional, a diferencia de la mayor parte de las fórmulas que se emplea en la hidráulica, que corresponden a modelos bidimensionales. El modelo permite también el estudio de diversas condiciones de diseño y operación.

Las pruebas con el modelo original permitirán conocer el comportamiento del flujo a lo largo de las obras de interconexión y así perfeccionar el diseño antes de iniciar la construcción de las obras.

#### **5.2 PLAN DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL**

Para el plan de pruebas se tomará mediciones en las secciones indicadas en la tabla 5.1, la misma que muestra los puntos de medición seleccionados con su correspondiente abscisado en Hec-Ras para su posterior validación. Los valores

de abscisas corresponden a datos entregados por el CGM sobre la modelación numérica.

Fase	Punto Medición	Descripción	Abscisa Hec-Ras
Túnel Fase AB	44	Inicio transición	334.6
	49	Fin transición	281.568
	54	Inicio cuenco	122.099
	55	Rampa 1 cuenco	114.53
	56	Rampa 2 cuenco	85.59
	57	Fin cuenco	78.29
	58	Vertedero	12.33
Túnel Fase C	15	Inicio transición	476.22
	20	Fin transición	423.19
	23	Inicio cuenco	185.08
	24	Rampa 1 cuenco	177.81
	25	Rampa 2 cuenco	61.74
	26	Fin cuenco	54.73
	28	Vertedero	22
Túnel Fase C1	60	Centro	121.3
Túnel descarga C.I	61	Inicio túnel	115.84
	65	Inicio transición	19.07
	66	Inicio C.I	12
	67	Vertedero Descarga Intermedia	0

TABLA N° 5.1 Puntos de Medición y Abscisado

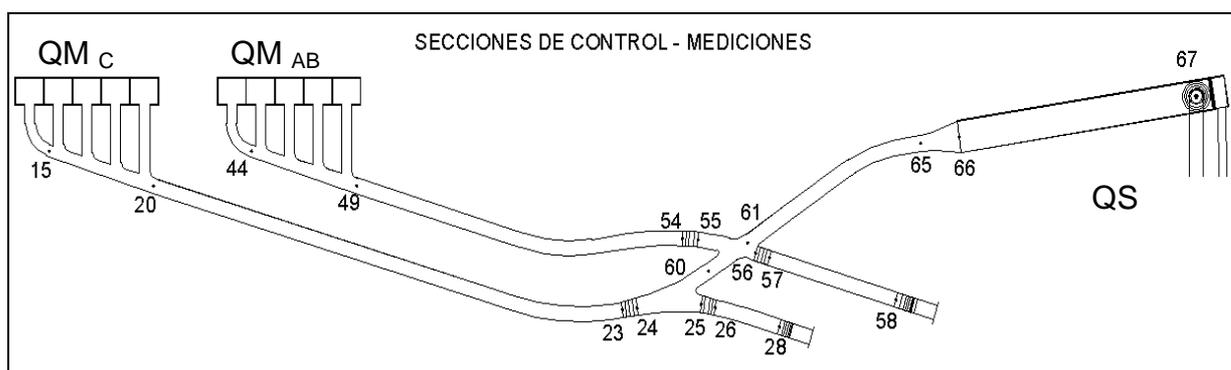


GRÁFICO 5.1. Secciones de control mediciones

### 5.2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS A SER REPRESENTADOS

CGM realizó la modelación numérica para el análisis de la operación de la central Sopladora planteando cuatro casos de estudio. Con esta referencia se realizarán las siguientes pruebas preliminares.

#### Caso 1:

Determinación del nivel de agua en la entrada a la cámara de interconexión cuando el caudal enviado desde Molino ( $Q_M$ ) es menor al caudal de diseño de Sopladora ( $Q_S$ ) y en los casos donde  $Q_M$  es mayor a  $Q_S$ .

Considerando las combinaciones de caudales mostradas en la tabla 5.2 para el caso de estudio N°1, se analizará los caudales más representativos.

PROTOTIPO	CAUDALES FASE AB (m <sup>3</sup> /s)						
		0	20	40	60	80	100
CAUDALES FASE C (m <sup>3</sup> /s)	0						
	20						
	40						
	60						
	80						
	100						

TABLA N° 5.2 Caudales modelados (Caso 1)

#### Caso 2:

Obtención del nivel máximo de operación de la cámara de interconexión bajo flujo permanente. En este caso se envía desde Molino un caudal de 200 m<sup>3</sup>/s (caudal prototipo), 100 m<sup>3</sup>/s por la Fase AB y los restantes 100 m<sup>3</sup>/s por la Fase C. Este caudal es evacuado por los 2 vertederos existentes de Molino más el vertedero ubicado en la cámara de interconexión.

#### Caso 3:

Se obtiene el nivel de la cámara de interconexión cuando desde Molino se envía un caudal de 150 m<sup>3</sup>/s (caudal prototipo), 50 m<sup>3</sup>/s son evacuados por la Fase AB y

100 m<sup>3</sup>/s por la Fase C, el caudal es descargado por los 2 vertederos de las descargas existentes y el vertedero ubicado en la cámara de interconexión.

Caso 4:

Reproducción del nivel máximo de la cámara de interconexión necesario para el estudio de un rechazo de carga que investigará la línea piezométrica máxima en las conducciones. El nivel inicial de la cámara será el correspondiente cuando desde Molino se envía un caudal de 200 m<sup>3</sup>/s, a Sopladora ingresan 150 m<sup>3</sup>/s y los 50 m<sup>3</sup>/s restantes son evacuados por los vertederos del río Paute.

Para los casos 1, 2 y 3 se determinarán los niveles de agua y se realizarán observaciones de los fenómenos más sobresalientes, en los puntos indicados en la tabla 5.1.

Para el caso 4 se determinará únicamente la variación del nivel de agua en la cámara de interconexión. Un rechazo de carga en la central Sopladora requiere de un tiempo aproximado de 30 segundos, lapso muy corto para la toma de datos en todos los puntos de medición.

Para tabular los resultados obtenidos en las pruebas con el diseño original se utilizó un formato de toma de datos. El formato se describe a continuación.

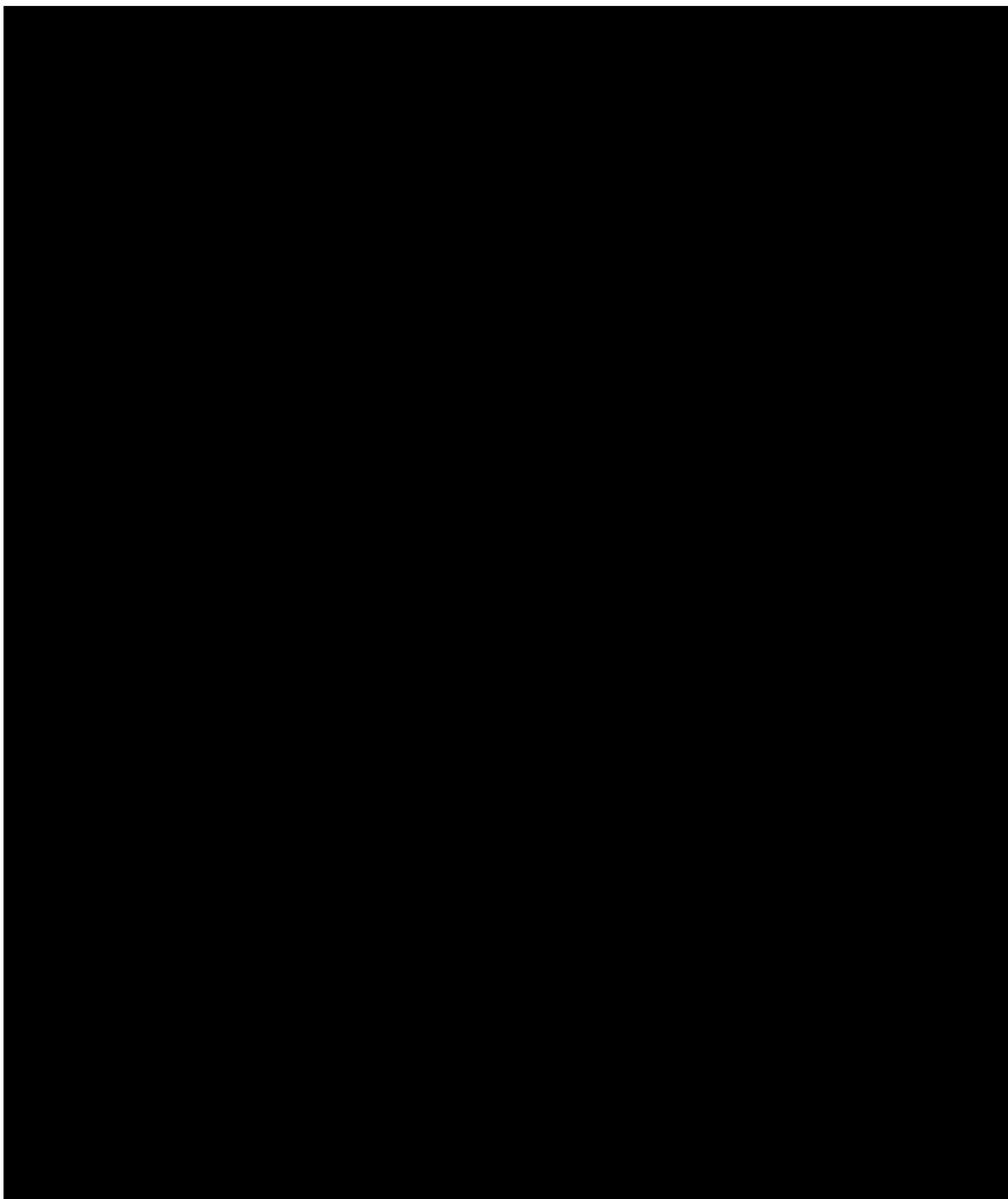


TABLA N° 5.3 Formato de toma de datos

### **5.3 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS DEL MODELO FÍSICO**

Las pruebas iniciales del modelo con el diseño original fueron ensayadas para evaluar el funcionamiento de las obras propuestas en cada uno de los casos de operación identificados por el consultor. Todas las pruebas reportadas fueron realizadas representando fielmente las obras de interconexión indicadas en los planos entregados por los consultores.

Se presentan cada uno de los casos estudiados y la interpretación de los resultados elaborado por los investigadores.

#### **5.3.1 CASO 1**

##### **5.3.1.1 Primera Prueba: $Q_{AB} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ - $Q_C = 20 \text{ m}^3/\text{s}$**

###### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Volumen muerto - agua estancada

**Fase C.-** Formación de ondas cortas de 1cm (20cm prototipo) de altura de cresta. Flujo supercrítico de inicio a fin de la transición desde la abscisa 1.24 (abscisa 476.22 prototipo) hasta la abscisa 3.89 (abscisa 423.29 prototipo). Presencia de ondas desde el final de la transición hasta la abscisa 5.89 (abscisa 383.29 prototipo). Luego el flujo se vuelve tranquilo en el resto del canal hasta la llegada al cuenco en la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo).

**Fase C1.-** Flujo tranquilo

**Fase ABC.-** Flujo tranquilo y estable

**C.I.-** Flujo tranquilo y estable. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1315msnm.

### 5.3.1.2 Segunda Prueba: $Q_{AB} = 40 \text{ m}^3/\text{s} - Q_C = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

#### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Presencia de ondas cortas desde el fin de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) hasta la llegada al cuenco en la abscisa 11.86 (abscisa 122.099 prototipo).

**Fase C.-** Formación de ondas largas de alrededor de 2cm (40cm prototipo) de altura de cresta desde la abscisa 1.24 (abscisa 476.22 prototipo) hasta la abscisa 3.89 (abscisa 423.29 prototipo), a lo largo de la transición. Formación de ondas cortas desde la abscisa 3.89 (abscisa 423.29 prototipo) hasta la abscisa 7.90 (abscisa 343.09 prototipo), luego el flujo se tranquiliza hasta la llegada al cuenco en la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo).

**Fase C1.-** Formación de ondas leves

**Fase ABC.-** Flujo tranquilo

**C.I.-** Flujo tranquilo con formación de leves ondulaciones. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1314.96msnm.

### 5.3.1.3 Tercera Prueba: $Q_{AB} = 40 \text{ m}^3/\text{s} - Q_C = 60 \text{ m}^3/\text{s}$

#### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Presencia de ondas cortas hasta la llegada al cuenco desde la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) hasta la abscisa 11.86 (abscisa 122.099 prototipo).

**Fase C.-** Formación de ondas largas de alrededor de 2cm (40cm prototipo) de altura de cresta desde el fin de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 476.22 prototipo) hasta la abscisa 7.89 (abscisa 423.29 prototipo), luego el flujo se tranquiliza hasta la llegada al cuenco en la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo).

**Fase C1.-** Formación de ondas leves

**Fase ABC.-** Flujo tranquilo

**C.I.-** Flujo tranquilo con formación de leves ondulaciones. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1315msnm.

#### 5.3.1.4 Cuarta Prueba: $Q_{AB} = 80 \text{ m}^3/\text{s} - Q_C = 80 \text{ m}^3/\text{s}$

##### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Presencia de ondas cortas y suaves desde la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) al fin de la transición hasta la abscisa 10.16 (abscisa 156.168 prototipo). Formación de ondas largas de alrededor de 3cm de altura (60cm prototipo) de cresta desde la abscisa 10.16 (abscisa 156.168 prototipo) hasta la llegada al cuenco en la abscisa 11.86 (abscisa 122.099 prototipo).

**Fase C.-** Presencia de ondas cortas y suaves desde la abscisa 3.89 (abscisa 476.22 prototipo) al fin de la transición hasta la abscisa 12.40 (abscisa 242.59 prototipo). Formación de ondas de alrededor de 3cm (60cm prototipo) de altura de cresta desde la abscisa 12.40 (abscisa 242.59 prototipo) hasta la llegada al cuenco en la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo).

**Fase C1.-** Formación de ondas cortas.

**Fase ABC.-** Presencia de ondas de hasta 3cm de altura (60cm prototipo) de cresta a lo largo del canal desde la abscisa 19.27 (abscisa 121.13 prototipo) a la abscisa 24.14 (abscisa 115.84 prototipo). A lo largo de la transición de entrada a la cámara de interconexión existe formación de ondas desde la abscisa 24.14 (abscisa 115.84 prototipo) hasta la abscisa 25.09 (abscisa 95.84 prototipo).

**C.I.-** Formación de vórtices permanentes de 1cm de altura (20cm prototipo), con mayor frecuencia. Vorticidad media y alta muy esporádica, con altura mayor a 10cm. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1315.40msnm.

#### 5.3.1.5 Quinta Prueba: $Q_{AB} = 60 \text{ m}^3/\text{s} - Q_C = 100 \text{ m}^3/\text{s}$

##### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Flujo tranquilo desde la salida de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) hasta la abscisa 10.86 (abscisa 142.168 prototipo). Formación de pequeñas ondas cortas de alrededor de 0.5cm de altura de cresta (10cm prototipo) desde la abscisa 10.86 (abscisa 142.168 prototipo) hasta la llegada al cuenco en la abscisa 11.86 (abscisa 122.099 prototipo).

**Fase C.-** Formación de pequeñas ondas cortas de alrededor de 1cm de altura de cresta (20cm prototipo) desde el fin de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 476.22 prototipo) a la abscisa 5.89 (abscisa 436.22 prototipo). Presencia de ondas cortas de alrededor de 2cm de altura de cresta (40cm prototipo) desde la abscisa 5.89 (abscisa 436.22 prototipo) hasta la llegada al cuenco en la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo).

**Fase C1.-** Formación de ondas cortas.

**Fase ABC.-** Presencia de ondas de alrededor de 2cm de altura de cresta (40cm prototipo).

**C.I.-** Vorticidad esporádica grande, mayor a 20cm de altura. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1315.40msnm.

**5.3.1.6 Sexta Prueba:**  $Q_{AB} = 60 \text{ m}^3/\text{s} - Q_C = 40 \text{ m}^3/\text{s}$

**Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Se presenta mucha turbulencia a la salida de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo). Formación de ondas y turbulencia desde el fin de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) hasta la abscisa 4.49 (abscisa 269.568 prototipo). Luego de la abscisa 4.49 (abscisa 269.568 prototipo) formación de ondas cortas hasta la llegada al cuenco en la abscisa 11.86 (abscisa 122.099 prototipo).

**Fase C.-** Formación de pequeñas ondas de alrededor de 0.5cm de altura de cresta (10cm prototipo) que se acentúan a 2.5cm de altura de cresta (50cm prototipo) desde la abscisa 3.89 (abscisa 423.19 prototipo) hasta la abscisa 14.3 (abscisa 242.88 prototipo). En el cuenco el flujo es tranquilo.

**Fase C1.-** Flujo tranquilo.

**Fase ABC.-** Flujo tranquilo sin perturbaciones.

**C.I.-** Vorticidad intermitente. Altura de vórtices alrededor de 10cm y menor. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1315msnm.

### 5.3.1.7 Séptima Prueba: $Q_{AB} = 100 \text{ m}^3/\text{s} - Q_C = 100 \text{ m}^3/\text{s}$

#### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Formación de ondas de altura de cresta de 2cm (40cm prototipo) desde el fin de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) hasta la abscisa 10.09 (abscisa 157.468 prototipo). Formación de ondas de 3cm altura de cresta (60cm prototipo) desde la abscisa 10.09 (abscisa 157.468 prototipo) hasta la llegada al cuenco en la abscisa 11.86 (abscisa 192.099 prototipo). Flujo con algo de turbulencia en el cuenco.

**Fase C.-** Formación de ondas de altura de cresta de 1.5cm (30cm prototipo) desde el fin de la transición en la abscisa 3.89 (abscisa 423.19 prototipo) hasta la abscisa 14.89 (abscisa 202.69 prototipo). Formación de ondas de 3cm de altura de cresta (60cm prototipo) desde la abscisa 14.89 (abscisa 202.69 prototipo) hasta la llegada al cuenco en la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo). Flujo con poca turbulencia en el cuenco.

**Fase C1.-** Presencia de turbulencia.

**Fase ABC.-** Formación de ondas grandes de alrededor de 2cm de altura de cresta (40cm prototipo) a lo largo de todo el canal desde la abscisa 19.27 (abscisa 121.13 prototipo) hasta la abscisa 25.09 (abscisa 95.84 prototipo). Turbulencia en la transición de entrada a la cámara de interconexión.

**C.I.-** Vorticidad muy intermitente. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1315.92msnm.

### 5.3.2 CASO 2

#### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Flujo tranquilo a lo largo del canal desde la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) hasta la abscisa 11.86 (abscisa 122.099 prototipo).

**Fase C.-** Formación de ondas de alrededor de 2cm de altura de cresta (60cm prototipo) desde la abscisa 3.89 (abscisa 423.19 prototipo) hasta la abscisa 5.89 (abscisa 383.19 prototipo). En el resto del canal el flujo es tranquilo hasta la llegada al cuenco en la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo)

**Fase C1.-** Flujo tranquilo.

**Fase ABC.-** Flujo tranquilo.

**C.I.-** Flujo tranquilo con formación de leves ondas. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1317.14msnm.

### 5.3.3 CASO 3

#### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Flujo tranquilo, sin perturbaciones a lo largo del canal y en el cuenco desde la abscisa 3.89 (abscisa 281.568 prototipo) hasta la abscisa 11.86 (abscisa 122.099 prototipo).

**Fase C.-** Formación de ondas cortas de 2cm (40cm prototipo) de altura desde la abscisa 3.89 (abscisa 423.19 prototipo) hasta la 4.20 (abscisa 416.19 prototipo). Flujo tranquilo en el resto del canal desde la abscisa 4.20 (abscisa 416.19 prototipo) hasta la abscisa 15.80 (abscisa 188.08 prototipo). Se presenta leve turbulencia en el cuenco.

**Fase C1.-** Formación de leves ondas.

**Fase ABC.-** Se presentan ondas cortas leves a lo largo del canal desde la abscisa 19.27 (abscisa 121.13 prototipo) hasta la abscisa 25.09 (abscisa 95.84 prototipo).

**C.I.-** Flujo tranquilo con formación de leves ondas. Nivel de agua al final de la cámara de interconexión en la cota 1316.80msnm.

### 5.3.4 CASO 4

#### **Descripción del Flujo:**

**Fase AB.-** Leves perturbaciones en el flujo a lo largo del canal.

**Fase C.-** Leves perturbaciones en el flujo a lo largo del canal.

**Fase C1.-** Flujo tranquilo

**Cámara de interconexión.-** El nivel de agua aumenta gradualmente desde la cota 1317msnm hasta la cota 1317.20msnm. No se presenta perturbaciones mayores de flujo en la cámara de interconexión.

## **5.4 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL CON EL DISEÑO ORIGINAL DE LAS OBRAS**

Finalizadas las pruebas con el diseño original, se distingue tres tipos de comportamiento del flujo a través de las obras de interconexión, para caudales bajos, medios y altos, que se describen a continuación. Las tablas de resultados de mediciones y cálculos de las diferentes variables hidráulicas se muestran en el anexo 7 de tablas y gráficos. Las fotografías para el funcionamiento normal de la central ( $150\text{m}^3/\text{s}$ ) se muestran en el anexo 1 de fotografías.

### **5.4.1 CAUDALES BAJOS**

Para la gama de caudales bajos analizados:  $20\text{m}^3/\text{s}$ ,  $40\text{m}^3/\text{s}$  y  $60\text{m}^3/\text{s}$ , se presenta flujo supercrítico ( $1.09 \leq Fr \leq 2.47$ ) con gran turbulencia a lo largo de la transición de entrada de las fases AB y C (puntos 44-49 y 15-20, ver gráfico 5.1) debido a la pendiente fuerte del fondo de los canales,  $lo=2.69\%$ . Se observa contracción de flujo al final de la transición producida por el choque de las masas de agua a la salida de las unidades. Mientras menor es el caudal, mayores son estas perturbaciones en la transición por la aceleración del flujo. A lo largo de las fases AB y C se forman ondas de longitud corta hasta la llegada a los cuencos disipadores de energía (puntos 49-54 y 20-23). En el túnel de interconexión se presentan ondas leves que se trasladan hasta la cámara, impidiendo que el nivel de agua se mantenga estable. Debido a la gradiente de velocidad en el pozo de carga, se forman vórtices intermitentes que entran a la tubería de carga.

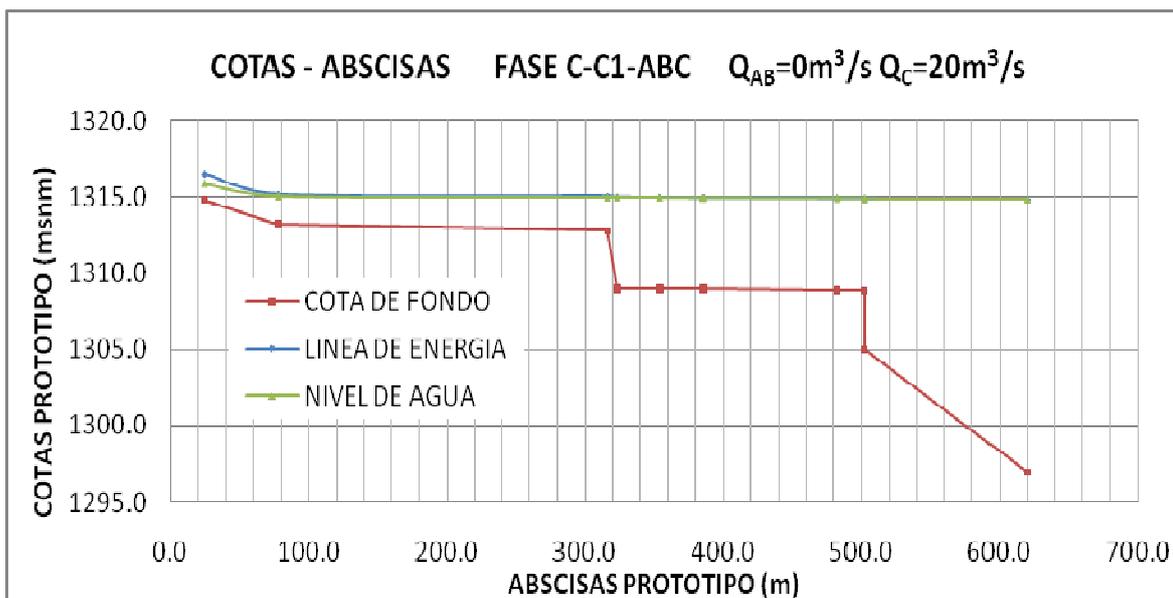


GRÁFICO 5.2. Líneas de Energía en prototipo Fase C-C1-ABC -  $Q_{AB} = 0\text{m}^3/\text{s}$  -  $Q_C = 20\text{m}^3/\text{s}$

PUNTO	FONDO CANAL (Y)	CALADO (h)	CAUDAL (Q)	VELOCIDAD (V)	NIVEL AGUA (Y + h)	$V^2/2g$	Abcsisa	LE PROTOTIPO	Froude
	[msnm]							[m]	
15	1314.78	1.080	19.213	3.558	1315.86	0.645	24.80	1316.51	1.09
20	1313.22	1.860	19.213	1.549	1315.08	0.122	77.80	1315.20	0.36
23	1312.78	2.200	19.213	1.309	1314.98	0.087	316.00	1315.07	0.28
24	1309.00	6.000	19.213	0.480	1315.00	0.012	323.20	1315.01	0.06
60	1309.00	5.980	19.213	0.482	1314.98	0.012	354.20	1314.99	0.06
61	1309.00	5.960	19.213	0.461	1314.96	0.011	385.40	1314.97	0.06
65	1308.90	6.040	19.213	0.454	1314.94	0.011	482.80	1314.95	0.06
66	1308.88	6.048	19.213	0.227	1314.93	0.003	501.80	1314.93	0.03
66'	1305.00	9.908	19.213	0.139	1314.91	0.001	501.80	1314.91	0.01
67	1297.00	17.880	19.213	0.077	1314.88	0.000	619.80	1314.88	0.01

TABLA N° 5.4 Variables hidráulicas prototipo  $Q_{AB} = 0\text{m}^3/\text{s}$  -  $Q_C = 20\text{m}^3/\text{s}$

## 5.4.2 CAUDALES MEDIOS

Las pruebas realizadas para caudales medios correspondientes a  $80\text{m}^3/\text{s}$ ,  $100\text{m}^3/\text{s}$  y  $120\text{m}^3/\text{s}$ , muestran la presencia de flujo supercrítico ( $Fr \approx 2.23$ ) con cierta turbulencia en la transición de entrada de las fases AB y C (puntos 44-49 y 15-20 respectivamente). De igual manera, continúa la formación de ondas en la fase ABC hasta la llegada a la cámara de interconexión. Se presenta vorticidad intermitente en la cámara y ondulaciones fuertes.

Para el caso de estudio N° 3 con un caudal de  $150\text{m}^3/\text{s}$ , el comportamiento del flujo es similar a los obtenidos en las pruebas del caso N° 1 para caudales medios. Existe mayor perturbación por la fase que transporta menor caudal.

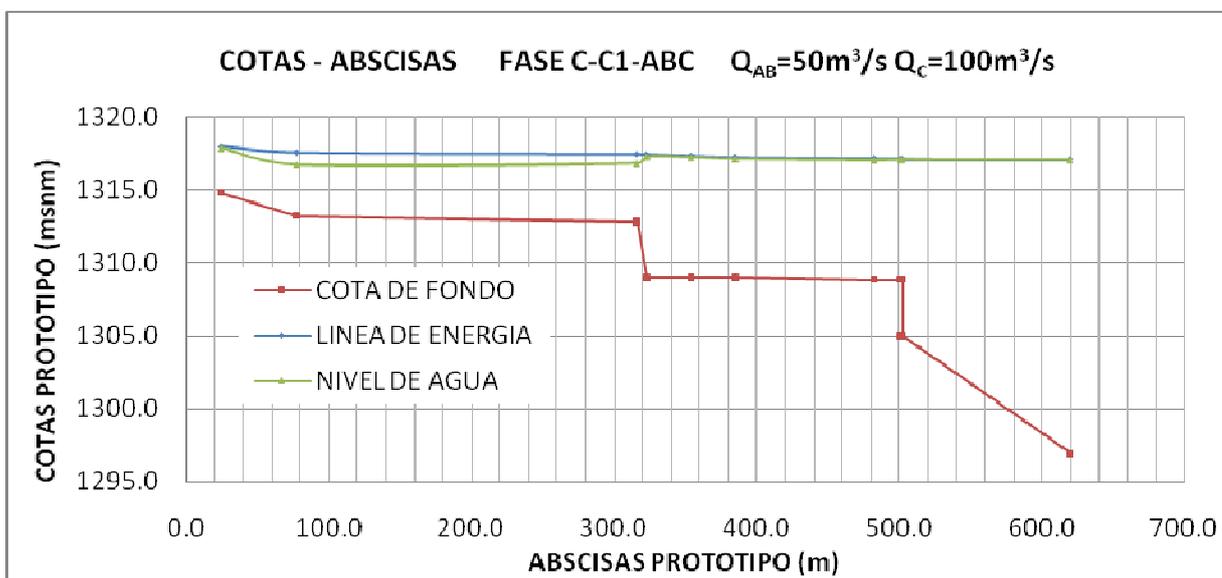


GRÁFICO 5.3. Líneas de Energía en prototipo Fase C-C1-ABC: Caso 2

PUNTO	FONDO CANAL (Y)	CALADO (h)	CAUDAL (Q)	VELOCIDAD (V)	NIVEL AGUA (Y + h)	$V^2/2g$	Abscisa	LE PROTOTIPO	Froude
	[msnm]	[m]	[ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	[m/s]	[msnm]	[m]		[msnm]	
15	1314.78	3.080	19.450	1.263	1317.86	0.081	24.80	1317.94	0.23
20	1313.22	3.490	94.077	4.041	1316.71	0.832	77.80	1317.54	0.69
23	1312.78	4.024	94.077	3.505	1316.80	0.626	316.00	1317.43	0.56
24	1309.00	8.260	94.077	1.708	1317.26	0.149	323.20	1317.41	0.19
60	1309.00	8.220	70.166	1.280	1317.22	0.083	354.20	1317.30	0.14
61	1309.00	8.100	85.207	1.503	1317.10	0.115	385.40	1317.22	0.17
65	1308.90	8.122	85.207	1.499	1317.02	0.114	482.80	1317.14	0.17
66	1308.88	8.200	85.207	0.742	1317.08	0.028	501.80	1317.11	0.08
66'	1305.00	12.060	85.207	0.505	1317.06	0.013	501.80	1317.07	0.05
67	1297.00	20.040	85.207	0.304	1317.04	0.005	619.80	1317.04	0.02

TABLA N° 5.5 Variables hidráulicas transformadas a prototipo: Caso 2

### 5.4.3 CAUDALES ALTOS

Para la gama de caudales altos:  $160\text{m}^3/\text{s}$ ,  $180\text{m}^3/\text{s}$  y  $200\text{m}^3/\text{s}$ , las ondas en las transiciones de entrada a las fases AB y C desaparecen debido al comportamiento subcrítico del fluido ( $0.23 \leq Fr \leq 0.90$ ). A lo largo de los canales de las fases AB y C se presentan leves ondas que al llegar a los colchones

disipadores. En el túnel de recolección las ondas se amplifican lo cual produce que el nivel en la cámara sea fluctuante con un Froude variable entre 0.21 y 0.50. Vorticidad esporádica casi nula en la cámara de Interconexión.

Para el caso de estudio N° 2 con caudal de  $200\text{m}^3/\text{s}$ , el flujo es más estable y las ondulaciones en la cámara son más leves. Al analizar el caso N° 4 los fenómenos producidos son mínimos, el incremento rápido de nivel de la cota 1315.84 a la 1317.07msnm ocasiona un grado elevado de perturbaciones en las obras de interconexión. Para caudales superiores a  $150\text{m}^3/\text{s}$ , el vertedero de la descarga intermedia trabaja como sección de control, manteniendo un espejo de agua casi horizontal aguas arriba.

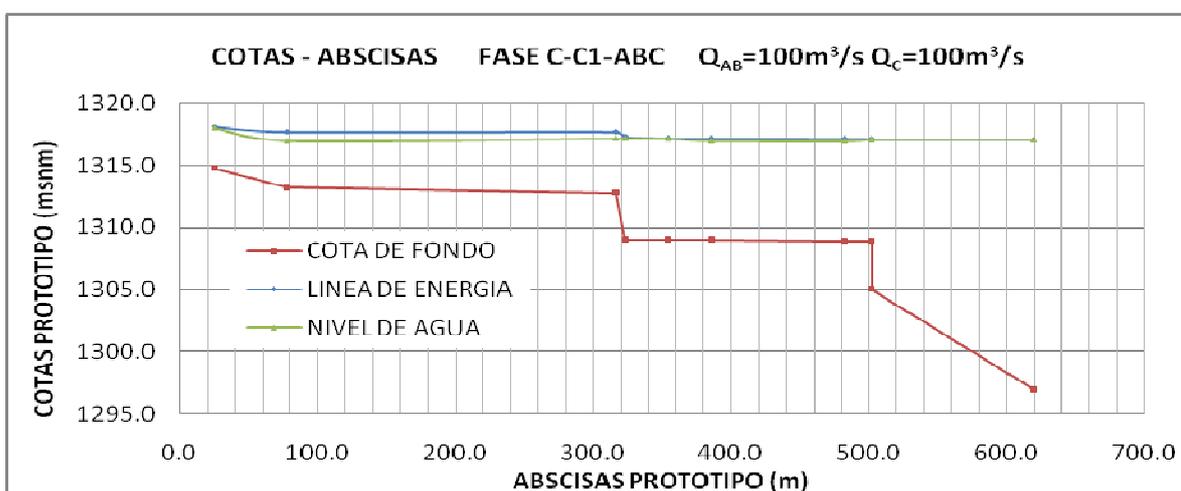


GRÁFICO 5.4. Líneas de Energía en prototipo Fase C-C1-ABC: Caso 3

PUNTO	FONDO CANAL (Y)	CALADO (h)	CAUDAL (Q)	VELOCIDAD (V)	NIVEL AGUA (Y + h)	$V^2/2g$	Abcsisa	LE PROTOTIPO	Froude
	[msnm]							[msnm]	
15	1314.78	3.240	19.450	1.201	1318.02	0.073	24.80	1318.09	0.21
20	1313.22	3.756	94.077	3.755	1316.98	0.719	77.80	1317.69	0.62
23	1312.78	4.380	94.077	3.220	1317.16	0.529	316.00	1317.69	0.49
24	1309.00	8.160	94.077	1.728	1317.16	0.152	323.20	1317.31	0.19
60	1309.00	8.140	52.630	0.969	1317.14	0.048	354.20	1317.19	0.11
61	1309.00	7.980	110.271	1.974	1316.98	0.199	385.40	1317.18	0.22
65	1308.90	8.060	110.271	1.954	1316.96	0.195	482.80	1317.15	0.22
66	1308.88	8.200	110.271	0.961	1317.08	0.047	501.80	1317.13	0.11
66'	1305.00	12.060	110.271	0.653	1317.06	0.022	501.80	1317.08	0.06
67	1297.00	20.060	110.271	0.393	1317.06	0.008	619.80	1317.07	0.03

TABLA N° 5.6 Variables hidráulicas transformadas a prototipo: Caso 3

## 5.5 ESTUDIO DEL FENÓMENO DE VORTICIDAD EN LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN

Entre las causas de formación de vórtices, la más frecuente es la excentricidad del flujo en el acercamiento de la toma y el conducto al que está conectada. En la mayor parte de casos, la asimetría en el acercamiento del flujo debido a condiciones geométricas causa la formación de vórtices, pero hay fenómenos hidráulicos responsables por la formación de vorticidad en geometrías simétricas, incluso con velocidades ideales de distribución en el acercamiento del flujo<sup>1</sup>.

En el caso de la cámara de interconexión del proyecto Sopladora, la presencia de vórtices está dada por los gradientes de velocidad que se producen en la toma.

Con el objeto de completar el alcance de la investigación para la cámara de interconexión operando en régimen permanente, se decide realizar una serie de ensayos expeditivos de vorticidad vs. sumergencia (ver anexos 8 de tablas y gráficos) para establecer el diseño de estructuras antivórtices que deban integrarse a la cámara y que garanticen su correcto funcionamiento.



FOTOGRAFIA No 5.1. Pruebas sumergencia vs. vorticidad. Caudal ensayado  $80\text{m}^3/\text{s}$ , cota 1313, presencia de vórtices intermitente a partir de esta cota.

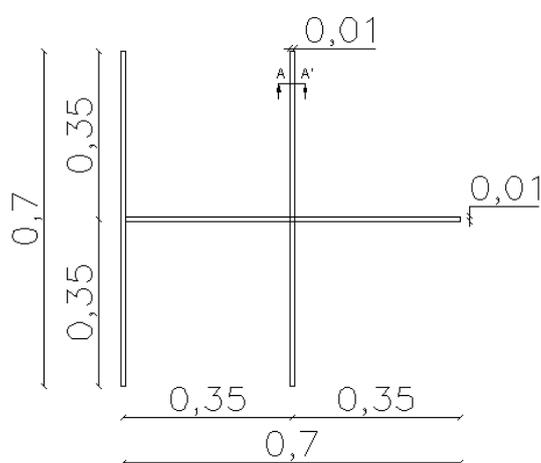
<sup>1</sup> Proyecto San Francisco – Estudio en modelo físico hidráulico - EPN

Estos ensayos permitirán ratificar y concretar la bondad de las estructuras antivórtices y servirán como punto de partida para el diseño definitivo de estructuras que permitan el correcto funcionamiento de la cámara operando a distintos niveles.

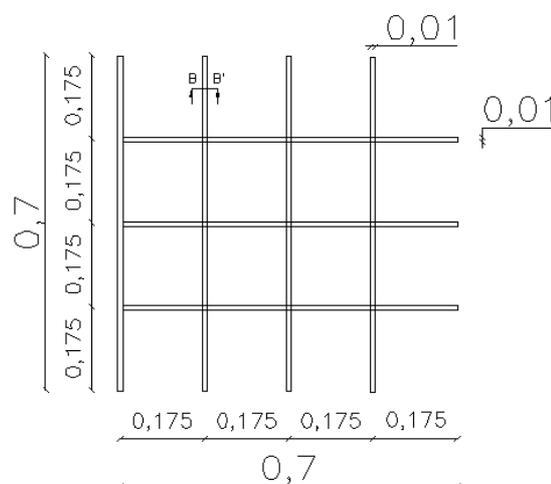
Se plantea como estructuras antivórtices la ejecución de rejillas que interfieran en la formación de vórtices de alta intensidad en la salida de la cámara de interconexión; que cubran todo el ancho de la cámara y que revistan la boca de entrada a la tubería de carga, esto es 14x14m (prototipo). De esta forma se abarca toda la zona donde se han observado los vórtices en los ensayos ejecutados en la primera fase.

En base a estudios en obras similares realizados anteriormente por la EPN (Estudio del modelo Hidráulico, Proyecto San Francisco), se decide ensayar dos tipos de rejillas como estructuras antivórtices (ver anexos plano 6 y anexo 3 de fotografías).

- Alternativa N° 1: Se divide a la rejilla en cuatro zonas iguales, dos zonas de 7m a cada lado del eje de simetría y dos zonas a lo largo de la misma longitud
- Alternativa N° 2: De divide a la rejilla en secciones de 1.4m x 1.4m, conformando un total de 16 unidades.



**Alternativa 1**

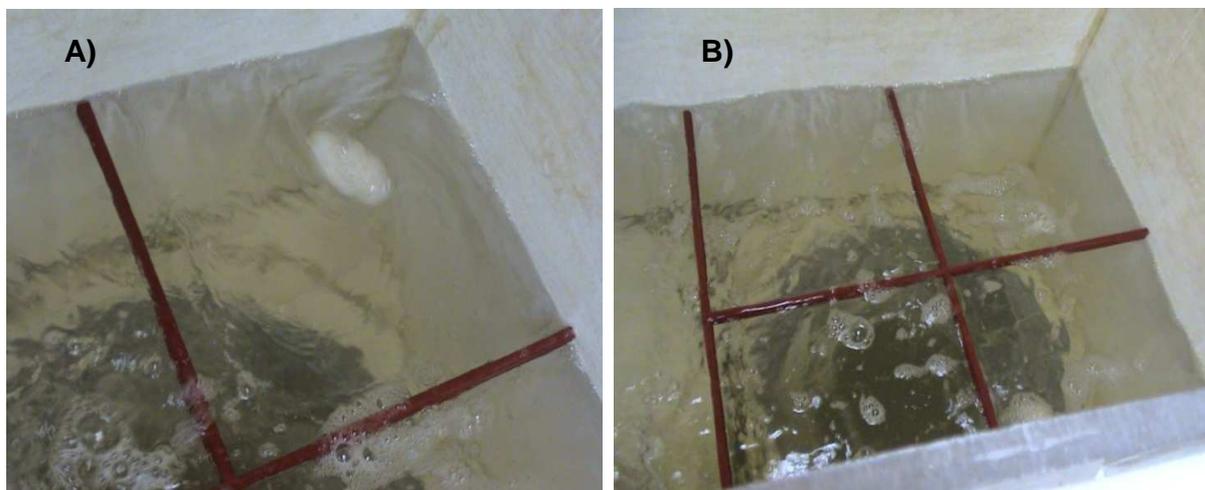


**Alternativa 2**

Las rejillas se estructuraron en madera, con una sección transversal de 1cm x 2cm que podría ser equivalente a dos tuberías de 200mm de diámetro en prototipo.

Se ensayaron caudales de  $60\text{m}^3/\text{s}$ ,  $80\text{m}^3/\text{s}$ , y  $120\text{m}^3/\text{s}$ , variando la cota de operación en la cámara de la 1304 a la 1314msnm. Estos ensayos fueron tomados como patrón para ejecutar todas las posibles alternativas de funcionamiento y establecer la tendencia de formación de vorticidad.

Se estableció que para la alternativa N° 1, se observa una rotación del fluido en cada cuadrícula que compone la malla, rotación que llega a transformarse en un vórtice de eje vertical, pues tiene la intensidad y la capacidad de introducir aire en el túnel de carga. Por otro lado los vórtices que se forman en los exteriores de la malla y que chocan con esta desaparecen completamente. Este efecto se anula completamente con la alternativa N° 2, producto de la interacción del fluido y la estructura.



FOTOGRAFIA No 5.2. Alternativa 1: La rejilla limita y controla la intensidad de circulación, pero aun existe presencia de vórtices que se rompen llegando a la rejilla. A) Formación de un vórtice. B) Desaparición del vórtice.



FOTOGRAFIA No 5.3. Alternativa 2: No hay presencia de vórtices. Se observa que esta malla tiene efectos definitivos en el control y eliminación de vórtices.

De las pruebas realizadas se establece que la segunda alternativa con mayor número de divisiones es la más óptima puesto que controla mejor la formación de vórtices, impidiendo que lleguen a la tubería de carga. Además se establece que si bien las rejillas controlan los vórtices, no pueden eliminarlos en un 100 %.

## 5.6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE VARIANTES

### CONCLUSIONES:

- Para un análisis objetivo de los resultados obtenidos con el diseño original, es necesario trabajar con una gama de caudales. Se observó que el comportamiento del flujo varía de acuerdo a la magnitud del caudal ensayado.

### Caso Nº 1:

- La turbulencia en la transición de entrada de las fases AB y C fue inversamente proporcional a la magnitud del caudal, presentándose mayor turbulencia en caudales bajos debido a la pendiente fuerte del fondo que generaba un régimen supercrítico del flujo ( $1 \leq Fr \leq 2.36$ ).

- En las fases AB y C el régimen del flujo es subcrítico con números de Froude que varían de  $Fr \approx 0.28$  para caudales bajos a  $Fr \approx 1.0$  para caudales altos, sin embargo no se logra mantener los niveles actuales de funcionamiento. Las ondas que se generan en la transición de entrada se desplazan a lo largo de los canales hasta la llegada a los cuencos.
- Los colchones de las fases AB y C no disipan totalmente la energía, ocasionando la formación de ondas en la fase ABC y en la cámara.
- En la cámara de interconexión la formación de ondas impide que el flujo se mantenga tranquilo y de nivel constante. También se observa que existe demasiada turbulencia en la transición de entrada causada por el aumento gradual del ancho de canal que produce una aceleración del flujo.

### **Caso N° 2 y 3:**

- Cuando la central Sopladora no está en funcionamiento, el nivel de agua alcanzado en los fosos de las unidades de las fases AB y C es 1318.1msnm para el caudal de  $200\text{m}^3/\text{s}$ ; esta cota no afecta el funcionamiento normal de las turbinas de la central Molino (1320msnm).
- El comportamiento del flujo en las obras de interconexión mejora en cuanto a la generación de ondas. Comparando los casos de estudio N° 1 para un caudal de  $200\text{m}^3/\text{s}$  con el caso de estudio N°2, el nivel de agua se incrementa de la cota 1315.80 a la 1317.07msnm en la cámara de interconexión, con velocidades bajas ( $1.2\text{m/s} \leq V \leq 4\text{m/s}$ ) y régimen subcrítico ( $0.21 \leq Fr \leq 0.69$ ).

### **Vorticidad:**

- Del análisis de vorticidad vs. sumergencia en la cámara de interconexión se observa que para toda la gama de caudales ensayados existe presencia de vórtices en la superficie cercana al vertedero de descarga intermedia, los cuales aumentan y se vuelven permanentes a medida que disminuye el caudal y el nivel de agua en la cámara.
- La formación de vórtices permanentes para todos los caudales ensayados se presentan aproximadamente en la cota 1305msnm.

Una vez realizadas las pruebas con el diseño original, se pudo notar dos problemas importantes en la conducción del flujo en las obras de interconexión.

1. No se logra mantener el nivel de operación actual en las fases AB y C, lo que significa, obtener un régimen supercrítico desfavorable.
2. Existe demasiada turbulencia en la cámara, fenómeno originado en la transición de entrada a la misma.

#### **RECOMENDACIONES:**

- Se recomienda aumentar la cota de los vertederos de descarga de las fases AB, C y descarga intermedia; para garantizar un embalse hacia aguas arriba y obtener mejores condiciones de flujo. Elevar la altura de los vertederos garantizaría un régimen subcrítico en las obras de interconexión y mayor carga de agua en la cámara lo que conlleva a evitar la presencia de vórtices.
- Para evitar la presencia de vórtices permanentes que causen entrada de aire a la tubería, la cota de operación de la cámara de interconexión debe ser mayor a 1305msnm.

## **CAPÍTULO 6**

### **ESTUDIO DE VARIANTES**

#### **6.1 PLAN DE PRUEBAS CON LAS VARIANTES SELECCIONADAS**

Analizados los resultados obtenidos con el diseño original, se realizarán ciertas modificaciones para la optimización de las obras de interconexión. Estas variantes tienen cuatro objetivos fundamentales.

- El control del calado hacia aguas arriba de la cámara, especialmente en la salida de las unidades de la Central Molino (10 unidades) y consecuentemente un funcionamiento hidráulico adecuado de los túneles de las Fases AB y C.
- Visualización del comportamiento hidráulico de la unión de las fases AB y C y del canal de aproximación a la cámara de interconexión.
- Eliminar la sección de control ocasionada por la transición gradual que ocasiona un cambio de régimen de subcrítico a supercrítico al inicio de la cámara cuando trabaja con niveles inferiores a 1312msnm.
- Mantener el flujo en la cámara, sin la formación de oscilaciones de masas de agua, que se presentan en los niveles mínimos de operación de la Cámara en toda la gama de caudales.

El plan de pruebas expeditivas propuestas para el mejor funcionamiento hidráulico integral de las obras de interconexión son las siguientes:

- Colocación de umbrales de fondo a la entrada de la Cámara de Interconexión.
- Cambio de la transición gradual de la entrada a la Cámara, por la continuación del túnel de interconexión hasta el inicio de la cámara.
- Colocación de Clapetas sobre los vertederos de salida de la fase AB, fase C y en la cámara de interconexión.

(Ver anexo 9 de tablas y gráficos y anexo plano 6).

### 6.1.1 UMBRALES DE FONDO EN LA ENTRADA A LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN

Esta prueba consiste en colocar umbrales de fondo en la entrada a la cámara. Los umbrales trabajarán como vertederos de pared gruesa y su propósito es elevar el calado hacia aguas arriba de la cámara, de tal manera que el caudal se transporte con bajas velocidades y con poca o nula turbulencia por la fase ABC.

Se ensayarán de manera expeditiva tres tipos de umbrales de las siguientes dimensiones: 70cm (14m prototipo) de ancho  $b$ , 8cm (1.6m prototipo) de espesor  $e$  y altura variable  $h$  de 2cm, 4cm y 6cm correspondientes a 0.4m, 0.8m y 1.2m prototipo.

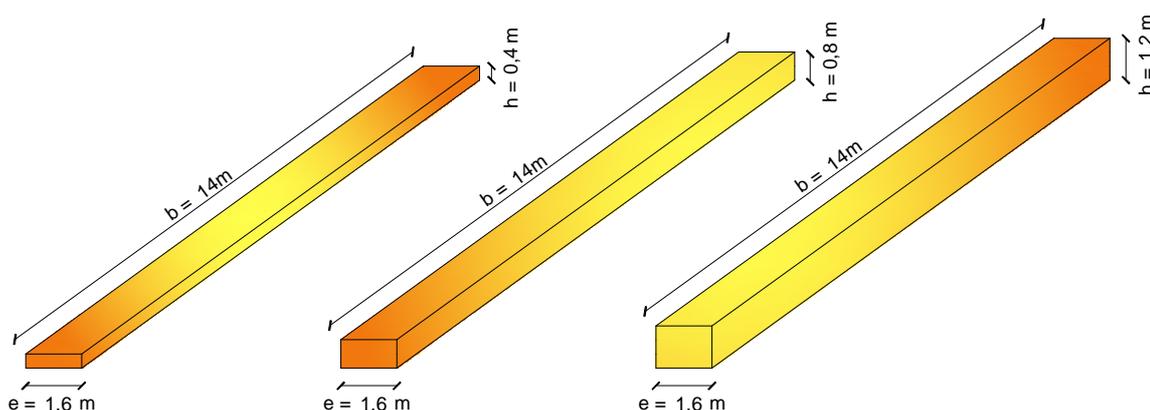


GRÁFICO N° 6.1. Dimensionamiento de los umbrales de fondo

El ancho de los umbrales será igual al ancho de la entrada a la cámara para que trabaje como vertedero rectangular sin contracciones. La altura de los umbrales se escogió basándose en observaciones de las alturas de ondas generadas en ensayos previos con un caudal de  $150\text{m}^3/\text{s}$  de tal manera que se eleve el nivel de agua, disminuyendo la velocidad del flujo y controlando la generación de ondulaciones. El espesor de los umbrales se lo calculó para que trabajen como vertederos de pared gruesa, para el caudal máximo ( $200\text{m}^3/\text{s}$  prototipo).

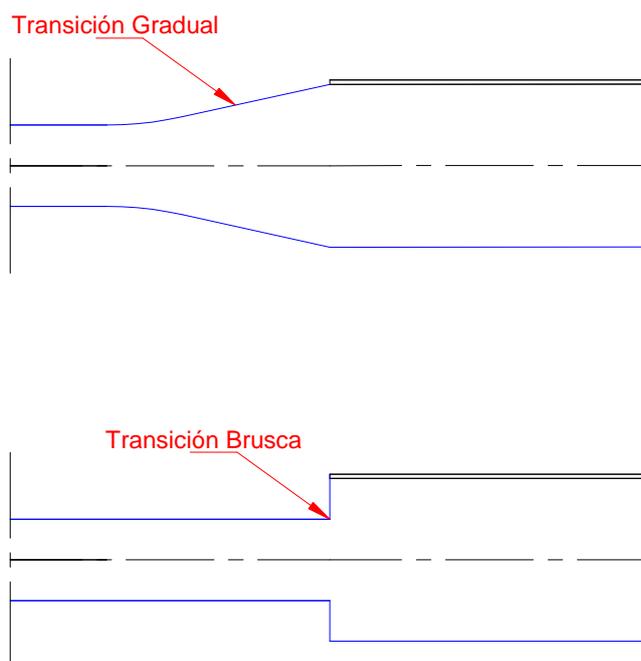
Se realizarán varios ensayos para el caudal de diseño con los tres tipos de umbrales descritos anteriormente. De los resultados obtenidos se escogerá el más óptimo. (Ver anexo 4 de fotografías).



FOTOGRAFÍA N° 6.1. Pruebas con umbrales de fondo en la entrada a la cámara de interconexión

### **6.1.2 CAMBIO DE LA TRANSICIÓN GRADUAL DE LA ENTRADA A LA CÁMARA, POR LA CONTINUACIÓN DEL TÚNEL DE INTERCONEXIÓN HASTA EL INICIO DE LA CÁMARA.**

Manteniendo el diseño del túnel de interconexión hasta el inicio de la cámara, se pretende conservar las mismas condiciones hidráulicas a lo largo del túnel, es decir, calados y velocidades, sin ocasionar el cambio de régimen de subcrítico a supercrítico como en el caso de la transición gradual cuando la cámara opera con niveles bajos.



Estas pruebas se realizaron para el caudal de diseño de  $150\text{m}^3/\text{s}$ . (Ver anexo 5 de fotografías).

### **6.1.3 CLAPETAS EN LOS VERTEDEROS DE DESCARGA DE LA FASE AB, FASE C Y DESCARGA INTERMEDIA**

El objetivo de la construcción de clapetas sobre la cresta de los vertederos de salidas de la fase AB y C de la Central Hidroeléctrica Molino, así como también en el vertedero de la cámara intermedia es, incrementar el nivel de agua en los túneles de las fases AB y C y mantener las mismas condiciones de funcionamiento hidráulicas antes de la interconexión de los mismos, para de esta manera mantener el mismo nivel de sumergencia en las 10 unidades de salida de la Central Hidroeléctrica Molino.

Cuando la Central Hidroeléctrica Molino opere con un caudal de  $200\text{m}^3/\text{s}$  y la Central Sopladora no esté en funcionamiento (Caso de estudio N°2), la cota de las clapetas en los vertederos de salida de las Fase AB y C se ubicarán en las cotas 1315.25 y 1315.4msnm respectivamente, garantizando que el exceso de caudal se descargue por los vertederos de las Fases AB, Fase C y el vertedero de la

cámara de interconexión, permitiendo que los túneles de las fases AB y C trabajen a superficie libre.

La altura de las clapetas escogida para las pruebas expeditivas fue de 10cm (2m prototipo) y se las colocará en dirección vertical. Esta altura garantiza que el flujo trabaje a régimen subcrítico y a nivel libre en los túneles de las fases AB y C. Así, los cimacios de las clapetas se ubicarán en las cotas 1317.25, 1317.4 y 1317msnm correspondientes a los vertederos de las descargas de la fase AB, fase C y descarga intermedia respectivamente.

De igual manera que en las pruebas anteriores, se experimentará este cambio para un caudal de  $150\text{m}^3/\text{s}$ . Además se ensayará con caudales de  $100\text{m}^3/\text{s}$  y  $200\text{m}^3/\text{s}$  para niveles de agua en la cámara de interconexión de 1312msnm y 1316msnm. Para el caso del caudal de  $200\text{m}^3/\text{s}$  se determinará el nivel alcanzado en la cámara. (Ver anexo 6 de fotografías).



FOTOGRAFÍA N° 6.2. Clapeta sobre el vertedero de descarga Fase AB

Las diferentes modificaciones al diseño original descritas anteriormente, se las realizó a manera de pruebas expeditivas. Una vez observados los fenómenos hidráulicos, y obtenidos los resultados de los cálculos de las variables hidráulicas

más representativas que puedan ocurrir con las nuevas variantes, la consultoría CGM en forma conjunta con los investigadores (EPN) decidirán el diseño definitivo de las obras de interconexión.

## 6.2 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES EN LAS PRUEBAS CON LAS VARIANTES EN EL MODELO

### 6.2.1 UMBRALES DE FONDO EN LA ENTRADA A LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN

Cuando la cámara de interconexión trabaja en la cota 1314msnm, los tres tipos de umbrales ensayados funcionan adecuadamente, manteniendo régimen subcrítico en el túnel de interconexión. Para niveles inferiores a 1314msnm la transición de entrada se vuelve sección de control ocasionando un cambio de régimen de subcrítico a supercrítico que produce un resalto hidráulico ahogado en la cámara de interconexión y causa que el flujo ingrese a grandes velocidades a la cámara.



FOTOGRAFÍA N° 6.3. Cambio de régimen a la entrada de la cámara



FOTOGRAFÍA N° 6.4. Resalto hidráulico ahogado al inicio de la cámara

Niveles mayores a la cota 1313.5msnm garantizan el funcionamiento adecuado de los umbrales, aunque el nivel hacia aguas arriba de la cámara no se incrementa significativamente, se nota un leve incremento únicamente en la Fase ABC. Los colchones disipadores ubicados a la salida de la Fase AB y de la Fase C impiden el incremento de nivel hacia aguas arriba cuando el nivel en la cámara está bajo la cota 1312.7 aproximadamente.

A pesar de usar diferentes alturas de umbral, se notó que estas elevaciones no influyen en gran medida en el incremento de calado hacia aguas arriba y que éste aumento de nivel de agua no es proporcional a la altura del umbral utilizado.

### **6.2.2 CAMBIO DE LA TRANSICIÓN GRADUAL DE LA ENTRADA A LA CÁMARA, POR LA CONTINUACIÓN DEL TÚNEL DE INTERCONEXIÓN HASTA EL INICIO DE LA CÁMARA**

La continuación del túnel de interconexión hasta el inicio de la cámara genera una transición brusca que funciona adecuadamente, incluso para niveles bajos de agua (hasta 1310msnm). No se produce ningún resalto hidráulico a lo largo de la transición y el flujo entra con pocas perturbaciones a la cámara. El túnel de interconexión desde los cuencos hasta el inicio de la cámara mantiene las mismas condiciones hidráulicas.



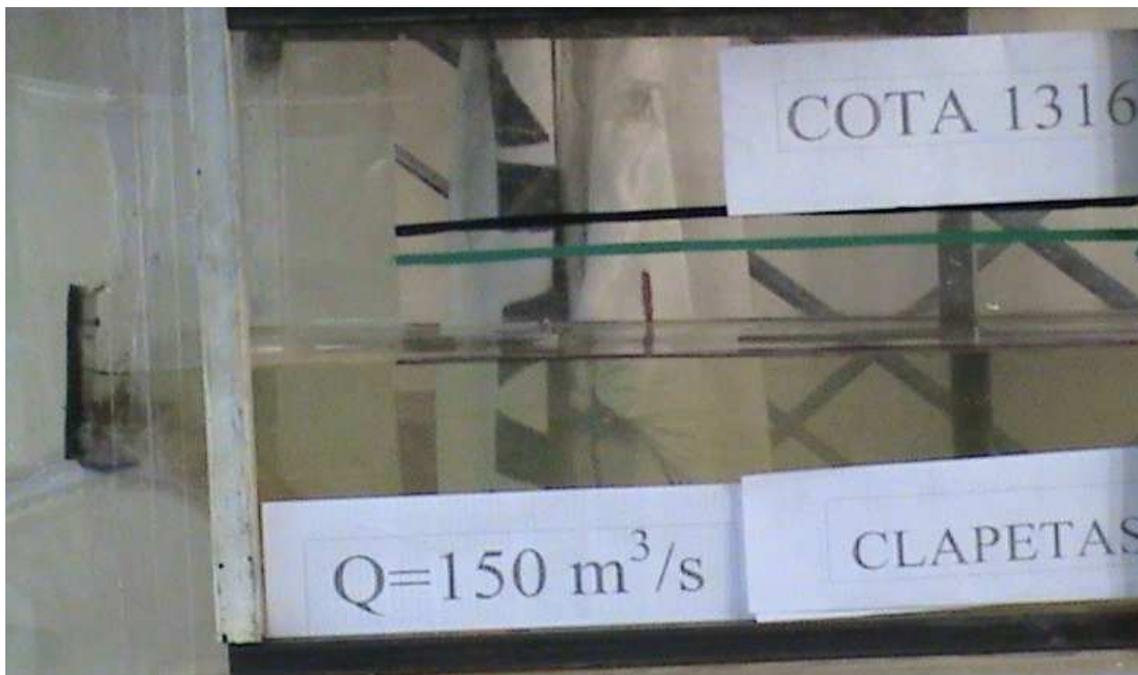
FOTOGRAFÍA N° 6.5. Entrada a la C.I con transición brusca

### 6.2.3 CLAPETAS EN LOS VERTEDEROS DE DESCARGA DE LA FASE AB, FASE C Y DESCARGA INTERMEDIA

El uso de clapetas sobre los tres vertederos de descarga cuando se trabajó con una cota de 1316msnm en la cámara de interconexión, elevó el nivel del agua a lo largo de los túneles de las Fases AB y C, obligándolos a trabajar en régimen subcrítico obteniendo velocidades en un rango de 0.9 a 1.8m/s y números de Froude del orden de 0.12 a 0.51. De igual manera en la Fase C1 y Fase ABC, el nivel de agua se elevó, disminuyendo la formación de ondas. En la cota 1312msnm no se notaron cambios puesto que la cresta de los tres vertederos está sobre la cota 1315msnm.



FOTOGRAFÍA N° 6.6. Flujo a lo largo de la Fase AB para un caudal total de 150m<sup>3</sup>/s.



FOTOGRAFÍA N° 6.7. Nivel en el vertedero de descarga Fase AB para un caudal total de  $150\text{m}^3/\text{s}$ .

### **6.3 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL DE VARIANTES**

#### **6.3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON UMBRALES DE FONDO**

Las tablas 6.1, 6.2 y 6.3 muestran que el comportamiento del flujo al ingreso de la cámara de interconexión varía de acuerdo al nivel de agua en la cámara. Para niveles bajos (menores a 1311msnm) el flujo se vuelve supercrítico a la entrada de la cámara, provocando gran turbulencia a lo largo de esta hasta la llegada al vertedero de descarga intermedia. Niveles de agua mayores en la cámara (superiores a 1314msnm) producen un mejor funcionamiento, aunque todavía existe formación de ondas.

ALTERNATIVA N° 1					
N° de Prueba	Calado en C.I. Modelo		Cota en C.I. Prototipo		Descripción
	Inicio (cm)	Fin (cm)	Inicio (msnm)	Fin (msnm)	
1	29.05	67.5	1310.81	1310.5	Régimen supercrítico a la transición de entrada a la CI. El flujo acelerado choca con los umbrales de fondo produciendo turbulencia excesiva en la cámara
2	45.5	83.4	1314.1	1313.68	Nivel mínimo para garantizar el adecuado funcionamiento en la Ci sin que exista un resalto hidráulico en la transición de entrada.

TABLA N° 6.1 Descripción del flujo a la entrada de la cámara de interconexión. Altura del umbral de fondo = 2cm (modelo), 0.40m (prototipo)

ALTERNATIVA N° 2					
N° de Prueba	Calado en C.I. Modelo		Cota en C.I. Prototipo		Descripción
	Inicio (cm)	Fin (cm)	Inicio (msnm)	Fin (msnm)	
1	29.17	66	1310.83	1310.2	Régimen supercrítico a la transición de entrada a la CI. El flujo acelerado choca con los umbrales de fondo produciendo turbulencia excesiva en la cámara
2	45	82.7	1314	1313.54	Nivel mínimo para garantizar el adecuado funcionamiento en la Ci sin que exista un resalto hidráulico en la transición de entrada.

TABLA N° 6.2 Descripción del flujo a la entrada de la cámara de interconexión. Altura del umbral de fondo = 4cm (modelo), 0.80m (prototipo)

ALTERNATIVA N° 3					
N° de Prueba	Calado en C.I. Modelo		Cota en C.I. Prototipo		Descripción
	Inicio (cm)	Fin (cm)	Inicio (msnm)	Fin (msnm)	
1		72		1311.4	Régimen supercrítico a la transición de entrada a la CI. El flujo acelerado choca con los umbrales de fondo produciendo turbulencia excesiva en la cámara
2	44.5	83	1313.9	1313.6	Nivel mínimo para garantizar el adecuado funcionamiento en la Ci sin que exista un resalto hidráulico en la transición de entrada.

TABLA N° 6.3 Descripción del flujo a la entrada de la cámara de interconexión. Altura del umbral de fondo = 6cm (modelo), 1.20m (prototipo)

Además se realizaron mediciones de calado en diferentes puntos del modelo para comparar estos valores con los obtenidos en el diseño original poner. El nivel en la cámara fue 1314msnm para todos los umbrales ensayados. La comparación de las variantes ejecutadas en el diseño original se la realizó a partir de la unión

del caudal proveniente de las Fases AB y C a través de la fase ABC. El caudal individual enviado por cada fase, al momento de realizar las pruebas no fue siempre el mismo dificultando la comparación, pero al sumar ambos caudales, estos valores se asemejaban más entre si para las diferentes alternativas. Los resultados de estas lecturas y cálculos de variables hidráulicas se muestran a continuación:

Fase	Punto de Medición	Descripción	DISEÑO ORIGINAL							UMBRAL DE FONDO ALTURA - 2cm MODELO						
			Modelo			Prototipo				Modelo			Prototipo			
			Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr	Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Fase C1	60	Centro	27.10	83.38	0.92	5.42	149.2	4.1	0.57	29.50	84.66	0.86	5.9	151.4	3.8	0.51
Fase ABC	61	Inicio túnel	22.80	83.38	1.04	4.56	149.2	4.7	0.70	24.40	84.66	0.99	4.88	151.4	4.4	0.64
	65	Inicio transición	21.20	83.38	1.12	4.24	149.2	5.0	0.78	18.50	84.66	1.31	3.7	151.4	5.8	0.97
	66	Inico C.I	45.70	83.38	0.26	9.14	149.2	1.2	0.12	21.30	84.66	0.57	4.26	151.4	2.5	0.39
	67	Verted. C.I	83.50	83.38	0.14	16.7	149.2	0.6	0.05	83.50	84.66	0.14	16.7	151.4	0.6	0.05

TABLA Nº 6.4 Comparación de variables hidráulicas entre el diseño original y la colocación de un umbral de fondo de 2cm de altura modelo (0.4m prototipo) en la entrada de la cámara. Cota en la cámara de interconexión 1314msnm.

Fase	Punto de Medición	Descripción	DISEÑO ORIGINAL							UMBRAL DE FONDO ALTURA - 4cm MODELO						
			Modelo			Prototipo				Modelo			Prototipo			
			Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr	Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Fase C1	60	Centro	27.10	83.38	0.92	5.42	149.2	4.1	0.57	31.80	83.09	0.78	6.36	148.6	3.5	0.44
Fase ABC	61	Inicio túnel	22.80	83.38	1.04	4.56	149.2	4.7	0.70	18.40	83.09	1.29	3.68	148.6	5.8	0.96
	65	Inicio transición	21.20	83.38	1.12	4.24	149.2	5.0	0.78	21.40	83.09	1.11	4.28	148.6	5.0	0.77
	66	Inico C.I	45.70	83.38	0.26	9.14	149.2	1.2	0.12	44.70	83.09	0.27	8.94	148.6	1.2	0.13
	67	Verted. C.I	83.50	83.38	0.14	16.7	149.2	0.6	0.05	82.00	83.09	0.14	16.4	148.6	0.6	0.05

TABLA Nº 6.5 Comparación de variables hidráulicas entre el diseño original y la colocación de un umbral de fondo de 4cm de altura modelo (0.8m prototipo) en la entrada de la cámara. Cota en la cámara de interconexión 1314msnm.

Fase	Punto de Medición	Descripción	DISEÑO ORIGINAL							UMBRAL DE FONDO ALTURA - 6cm MODELO						
			Modelo			Prototipo				Modelo			Prototipo			
			Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr	Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Fase C1	60	Centro	27.10	83.38	0.92	5.42	149.2	4.1	0.57	27.80	83.09	0.90	5.56	148.6	4.0	0.54
Fase ABC	61	Inicio túnel	22.80	83.38	1.04	4.56	149.2	4.7	0.70	21.70	83.09	1.09	4.34	148.6	4.9	0.75
	65	Inicio transición	21.20	83.38	1.12	4.24	149.2	5.0	0.78	21.50	83.09	1.10	4.3	148.6	4.9	0.76
	66	Inico C.I	45.70	83.38	0.26	9.14	149.2	1.2	0.12	44.50	83.09	0.27	8.9	148.6	1.2	0.13
	67	Verted. C.I	83.50	83.38	0.14	16.7	149.2	0.6	0.05	83.00	83.09	0.14	16.6	148.6	0.6	0.05

TABLA Nº 6.6 Comparación de variables hidráulicas entre el diseño original y la colocación de un umbral de fondo de 6cm de altura modelo (1.2m prototipo) en la entrada de la cámara. Cota en la cámara de interconexión 1314msnm.

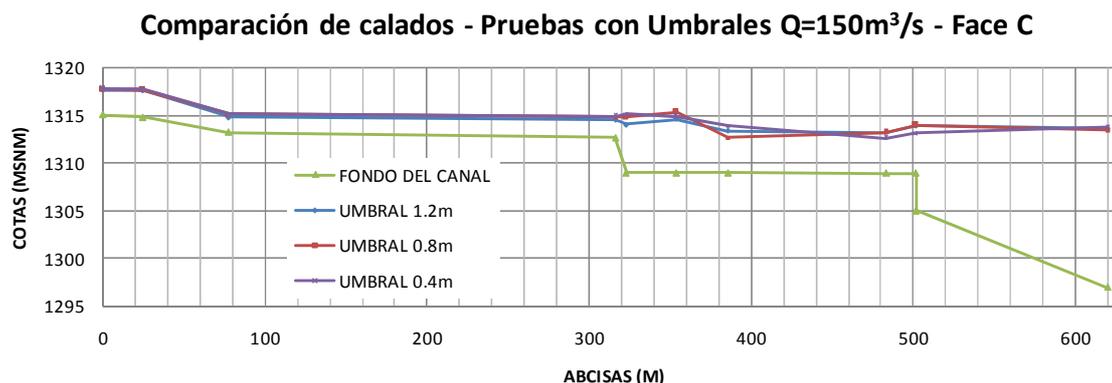


GRÁFICO N° 6.2. Calados superpuestos de pruebas con los tres umbrales

De las tablas 6.4, 6.5 y 6.6 y del gráfico 6.2 se determina que no existe mayor variación de calados y velocidades en los túneles de interconexión con las distintas alternativas ensayadas para los umbrales de fondo. Los umbrales no trabajan como secciones de control debido a que la transición en la entrada a la cámara es la que gobierna el comportamiento del flujo en esta zona.

### 6.3.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL CAMBIO DE LA TRANSICIÓN GRADUAL DE LA ENTRADA A LA CÁMARA, POR LA CONTINUACIÓN DEL TÚNEL DE INTERCONEXIÓN HASTA EL INICIO DE LA CÁMARA

Al colocar una transición brusca en la entrada de la cámara de interconexión se observó que el flujo ingresaba con menor turbulencia. En la tabla 6.7 se muestra los niveles de agua alcanzados en la cámara.

TRANSICIÓN BRUSCA					
N° de Prueba	Calado en C.I Modelo		Calado en C.I Prototipo		Descripción
	Inicio (cm)	Fin (cm)	Inicio (msnm)	Fin (msnm)	
1	42.1	82.1	1313.42	1313.42	No se produce resalto hidráulico, manteniendo las condiciones de flujo hacia aguas arriba

TABLA N° 6.7 Descripción del flujo a la entrada de la cámara de interconexión con una transición brusca al inicio de la cámara.

La tabla 6.8 compara los calados y velocidades medidas entre el diseño original y la transición brusca cuando la central Sopladora opera con el caudal de diseño. El calado desde el túnel de interconexión hasta el inicio de transición de entrada se eleva en un 6% con respecto al diseño original. Con esta variante se logra mejorar las condiciones de ingreso del flujo hacia la cámara, aunque las velocidades en el túnel de interconexión no varían significativamente.

Fase	Punto de Medición	Descripción	DISEÑO ORIGINAL							TRANSICIÓN BRUSCA						
			Modelo			Prototipo				Modelo			Prototipo			
			Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr	Calado (cm)	Caudal (l/s)	Veloc (m/s)	Calado (cm)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Fase C1	60	Centro	27.10	83.38	0.92	5.42	149.2	4.1	0.57	29.10	85.45	0.88	5.82	152.9	3.9	0.52
Fase ABC	61	Inicio túnel	22.80	83.38	1.04	4.56	149.2	4.7	0.70	24.40	85.45	1.00	4.88	152.9	4.5	0.79
	65	Inicio transición	21.20	83.38	1.12	4.24	149.2	5.0	0.78	21.40	85.45	1.14	4.28	152.9	5.1	0.14
	66	Inico C.I	45.70	83.38	0.26	9.14	149.2	1.2	0.12	42.10	85.45	0.29	8.42	152.9	1.3	0.05
	67	Verted. C.I	83.50	83.38	0.14	16.7	149.2	0.6	0.05	82.10	85.45	0.15	16.42	152.9	0.7	0.00

TABLA N° 6.8 Comparación de variables hidráulicas entre el diseño original y la colocación de una transición brusca en la entrada de la cámara. Cota en la cámara de interconexión 1314msnm.

### 6.3.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON CLAPETAS EN LOS VERTEDEROS DE DESCARGA

En la tabla 6.9 se observa que la cota promedio medida a la salida de las unidades para un caudal de 150m<sup>3</sup>/s es de 1818.5msnm. Al comparar este nivel con el alcanzado para el mismo caudal con el diseño original (1317.5msnm), se nota un incremento de calado en las unidades de 1m de altura correspondiente a un 40%. Además, este nivel de agua no sobrepasa los valores permitidos para el correcto funcionamiento de las turbinas, valor aproximado de 1320msnm.

Caudal Máximo Molino 200m <sup>3</sup> /s		CALADO MODELO (cm)		CALADO PROTOTIPO (m)		COTA PROTOTIPO (msnm)	
		Diseño Original	Clapetas vertederos AB y C	Diseño Original	Clapetas vertederos AB y C	Diseño Original	Clapetas vertederos AB y C
Fase	Descripción	Cota C.I 1316msnm	Cota C.I 1318msnm	Cota C.I 1316msnm	Cota C.I 1318msnm	Cota C.I 1316msnm	Cota C.I 1318msnm
AB	Unidad 1	13.20	18.90	2.64	3.78	1317.64	1318.78
	Unidad 2	13.20	18.7	2.64	3.74	1317.64	1318.74
	Unidad 3	12.70	18.8	2.54	3.76	1317.54	1318.76
	Unidad 4	10.70	18.1	2.14	3.62	1317.14	1318.62
	Unidad 5	9.90	17	1.98	3.4	1316.98	1318.4
C	Unidad 1	14.40	18.9	2.88	3.78	1317.88	1318.78
	Unidad 2	15.10	19	3.02	3.8	1318.02	1318.8
	Unidad 3	14.20	9	2.84	1.8	1317.84	1316.8
	Unidad 4	12.70	10.5	2.54	2.1	1317.54	1317.1
	Unidad 5	10.40	15.5	2.08	3.1	1317.08	1318.1

TABLA N° 6.9 Calados medidos a la salida de las unidades para un caudal de 200m<sup>3</sup>/s

Se comparó adicionalmente el calado medido para esta variante con el diseño original en los demás puntos de medición del modelo, para un caudal de 200m<sup>3</sup>/s. El nivel de agua en los túneles de interconexión aumenta un promedio de 3m con respecto al diseño original, haciendo trabajar a las fases AB y C bajo régimen subcrítico.

Caudal Máximo Molino 200m <sup>3</sup> /s			CALADO MODELO (cm)		CALADO PROTOTIPO (m)	
			Diseño Original	Clapetas vertederos AB y C	Diseño Original	Clapetas vertederos AB y C
Fase	Pto medición	Descripción	Cota C.I 1316msnm	Cota C.I 1318msnm	Cota C.I 1316msnm	Cota C.I 1318msnm
Túnel Fase AB	44	Inico transición	14.54	16.30	2.91	3.26
	49	Fin transición	14.37	27.1	2.87	5.42
	54	Inico cuenco	14.54	29.3	2.91	5.86
	55	Rampa 1 cuenco	36.5	42.2	7.30	8.44
	56	Rampa 2 cuenco	35	47.5	7.00	9.50
	57	Fin cuenco	16.7	28.9	3.34	5.78
Túnel Fase C	58	Vertedero	17.5	31.6	3.50	6.32
	15	Inico transición	15.4	19.3	3.08	3.86
	20	Fin transición	14.77	24.1	2.95	4.82
	23	Inico cuenco	14.86	27.4	2.97	5.48
	24	Rampa 1 cuenco	34.4	46.4	6.88	9.28
	25	Rampa 2 cuenco	36	48.8	7.20	9.76
	26	Fin cuenco	18	30	3.60	6.00
28	Vertedero	18.3	31.2	3.66	6.24	
Túnel C1	60	Centro	34.3	47.2	6.86	9.44
Túnel Fase ABC	61	Inicio túnel	31.1	46.9	6.22	9.38
	65	Inicio transición	31.7	46.3	6.34	9.26
	66	Inico C.I	54	67.40	10.80	13.48
	67	Verted. C.I	94.1	105.60	18.82	21.12

TABLA N° 6.10 Comparación de calados colocando clapetas en los vertederos. Q = 200m<sup>3</sup>/s.

Para el caudal de diseño, se produce una elevación de altura de agua en las obras de interconexión que establece condiciones subcríticas de flujo y disminuye la velocidad de conducción a través de los canales ( $0.09 \leq Fr \leq 0.40$ ). Los resultados se muestran en la tabla 6.11.

Caudal de Diseño Sopladora 150m <sup>3</sup> /s			PROTOTIPO - COTA C.I = 1316msnm			
			Calado	Caudal	Veloc m/s	Froude
Fase	Pto medición	Descripción	m	m <sup>3</sup> /s	m/s	Fr
Túnel Fase AB	44	Inico transición	3.26	16.05	0.98	0.17
	49	Fin transición	3.24	49.14	2.27	0.40
	54	Inico cuenco	3.78	49.14	1.95	0.32
	55	Rampa 1 cuenco	7.64	49.14	0.96	0.11
	56	Rampa 2 cuenco	7.3	0.00	0.00	0.00
	57	Fin cuenco	3.56	0.00	0.00	0.00
	58	Vertedero	4.12	0.00	0.00	0.00
Túnel Fase C	15	Inico transición	3.12	19.55	1.25	0.23
	20	Fin transición	3.28	19.55	0.89	0.16
	23	Inico cuenco	3.52	19.55	0.83	0.14
	24	Rampa 1 cuenco	7.1	19.55	0.41	0.05
	25	Rampa 2 cuenco	7.56	0.00	0.00	0.00
	26	Fin cuenco	3.9	0.00	0.00	0.00
	28	Vertedero	4.12	0.00	0.00	0.00
Túnel C1	60	Centro	7.36	97.11	1.98	0.23
Túnel Fase ABC	61	Inicio túnel	7.04	146.26	2.97	0.36
	65	Inicio transición	7	146.26	2.98	0.36
	66	Inico C.I	7.42	146.26	1.41	0.17
	67	Verted. C.I	11.22	146.26	0.93	0.09

TABLA Nº 6.11 Cálculo de variables hidráulicas con clapetas en los vertederos de descarga de las fases AB y C. Caudal 150m<sup>3</sup>/s, cota en la C.I = 1316msnm

En el gráfico 6.3 se observa la variación del nivel de agua en la fase C, en el túnel de interconexión y en la cámara, para distintos valores de caudal de ingreso desde la central Molino. La fase C está operando con caudales de 50m<sup>3</sup>/s para un caudal total de Sopladora de 100m<sup>3</sup>/s y 100m<sup>3</sup>/s cuando Sopladora trabaja con 150 y 200m<sup>3</sup>/s. Cuando se ensayó el caudal de 200 m<sup>3</sup>/s, el nivel de agua se elevó hasta la cota 1318msnm en la cámara y aguas arriba hasta la cota 1318.8msnm en la salida de las unidades, dejando una seguridad de 1.2m para el nivel de operación de las turbinas de Molino. En los caudales de 100 y 150m<sup>3</sup>/s, la cámara se estabilizó en la cota 1316msnm aproximadamente.

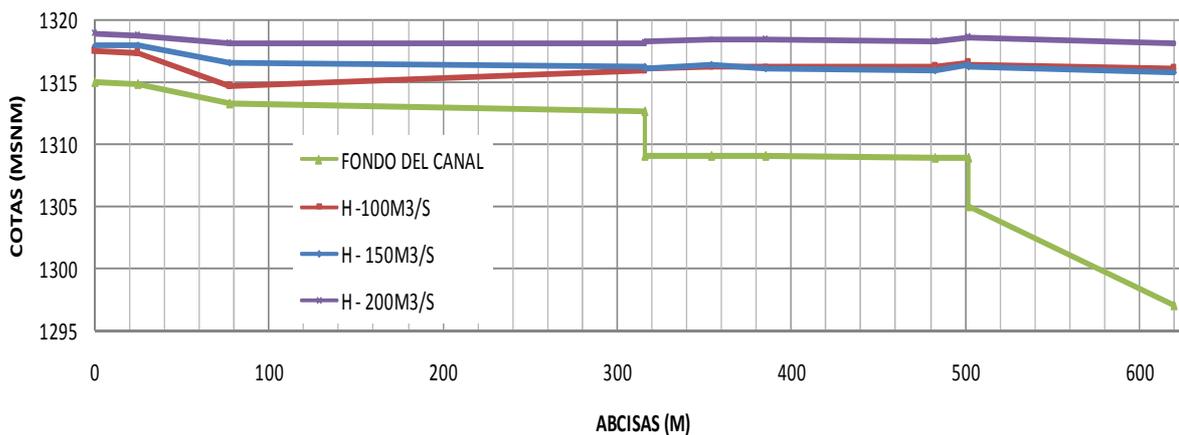


GRÁFICO N° 6.3. Comparación de calados – Pruebas con clapetas Fase C

## 6.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES:

#### Umbrales de fondo:

- Para niveles menores a 1311msnm el flujo a la entrada de la cámara se vuelve supercrítico, niveles superiores a 1314msnm mejoran el comportamiento del flujo, aunque todavía existe formación de ondas en la cámara.
- Los umbrales no trabajan como secciones de control debido a que la transición en la entrada a la cámara es la que gobierna el comportamiento del flujo en esta zona.
- No existe mayor variación de calados y velocidades en los túneles de interconexión con las distintas alternativas ensayadas para los umbrales de fondo.
- Los umbrales de fondo para el caso de las obras de interconexión, no brindan la ayuda necesaria para mejorar el comportamiento del flujo. Sería conveniente realizar otro tipo de pruebas cambiando la ubicación y geometría de estas estructuras.

### **Cambio de la transición gradual de la entrada a la Cámara, por la continuación del túnel de interconexión hasta el inicio de la cámara:**

- Comparando la alternativa de la transición brusca a la entrada de la cámara con la original (transición gradual), se observa una mejoría en el comportamiento del flujo en el túnel de interconexión, incluso para niveles bajos de hasta 1310msnm.
- No se produce ningún resalto hidráulico a lo largo de la transición y el flujo entra con pocas perturbaciones a la cámara.
- El calado desde el túnel de interconexión hasta el inicio de transición de entrada se eleva en un 6% con respecto al diseño original, permitiendo mejores condiciones de ingreso del flujo hacia la cámara.

### **Clapetas:**

- De los resultados obtenidos se estableció que para el caudal de diseño de Sopladora ( $150\text{m}^3/\text{s}$ ), el calado aumenta hasta alcanzar un nivel similar al obtenido para  $80\text{m}^3/\text{s}$ , trabajando cada fase individualmente. Para el caudal máximo enviado desde Molino ( $200\text{m}^3/\text{s}$ ) el nivel de agua es muy cercano al obtenido trabajando cada fase por separado con un caudal de  $100\text{m}^3/\text{s}$ .
- Para el caudal máximo enviado desde Molino, el nivel de agua alcanza los 1318msnm en la cámara y los 1318.8msnm en las unidades de las fases AB y C, estos niveles no interfieren en el correcto funcionamiento de las turbinas de Molino.
- Para el caudal de diseño, se produce una elevación de altura de agua en las obras de interconexión que establece condiciones subcríticas de flujo con números de Froude que varían de 0.09 a 0.40.

### **RECOMENDACIONES:**

- De las pruebas realizadas para las distintas variantes del diseño original, la transición brusca a la entrada de la cámara brinda una solución a la turbulencia generada en la cámara cuando esta trabaja con niveles bajos. Por

otro lado, el uso de clapetas en los vertederos de descarga permiten elevar el nivel en los túneles de las fases AB y C haciendo que trabajen en régimen subcrítico, cuando la cámara opera con niveles altos. Se recomienda el uso conjunto de estas dos estructuras para garantizar el correcto funcionamiento de las obras de interconexión.

- Es necesario analizar otro tipo de estructuras que disminuyen o anulen por completo las olas formadas en la cámara de interconexión, que la transición brusca no logra eliminar.
- Tomando en cuenta que para el funcionamiento de las clapetas se necesitan instrumentos electromecánicos, una falla ocasionaría que la central Sopladora no opere correctamente. No sería posible estabilizar la carga de agua en la cámara por medios eléctricos, por lo que se debería maniobrar las clapetas manualmente.

## **CAPÍTULO 7**

### **SELECCIÓN DEL DISEÑO RECOMENDADO PARA LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN**

#### **7.1 MODIFICACIONES AL DISEÑO ORIGINAL**

Analizadas las variantes realizadas en el diseño original descritas en el Capítulo VI, los consultores deciden realizar un cambio de diseño. Las modificaciones físicas a realizar representan un cambio aproximado del 40% del total del modelo (ver anexos planos 4 y 5), y son:

- Cambio de la pendiente del túnel de la fase ABC de 0.115% a 0.8%. El nuevo diseño corresponde a la pendiente crítica para el caudal de diseño de Sopladora ( $150\text{m}^3/\text{s}$ ). Esta variante tiene por objeto disminuir o controlar las ondas producidas en la fase ABC debidas a la gran turbulencia generada en los cuencos disipadores de las fases AB y C.
- Elevación de la cota del vertedero de descarga intermedia de la 1315msnm a la cota 1315.60msnm. Siendo este vertedero una sección de control, al elevar su altura, se incrementará también el nivel hacia aguas arriba, condición favorable para desacelerar el flujo en las obras de interconexión.
- Conservar la transición de entrada a la cámara de interconexión entre las abscisas 171.79 y 190.87m.

El nuevo diseño pretende mejorar el compartimiento del fluido que viaja a través de las obras de interconexión, de tal manera que al llegar a la cámara el nivel de agua se mantenga estable, al mismo tiempo que se disminuyan las perturbaciones y ondas generadas a lo largo del túnel de interconexión.

## 7.2 OBSERVACIONES Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL CAMBIO DE DISEÑO HIDRÁULICO

La tabla 7.1 muestra los resultados de los ensayos realizados para un caudal de  $150\text{m}^3/\text{s}$  de ingreso a la central Sopladora. El nivel de agua en las unidades alcanza la cota 1317.66msnm, manteniéndose por debajo del valor permitido para la operación de las turbinas de la central Molino. En las fases AB y C se da un cambio de régimen de subcrítico a supercrítico ( $0.22 \leq Fr \leq 1.61$ ), que ocasiona turbulencia y generación de ondas a lo largo de los canales; altas velocidades hasta de  $6.15\text{m/s}$ . (ver anexo 10 tablas y gráficos).

Fase	Punto de Medición	Descripción	Ancho Modelo (m)	Nuevo Diseño - $Q=150\text{m}^3/\text{s}$					
				Calado Modelo (cm)	Calado Prototipo (m)	Caudal Modelo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Caudal Prototipo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Veloc (m/s)	Froude Fr
Unidades de Entrada al modelo		Unidad 1 Fase AB	0.25	10.30	2.06	0.0107	19.1731	1.86	0.41
		Unidad 2 Fase AB	0.25	11.40	2.28	0.0110	19.6780	1.73	0.36
		Unidad 3 Fase AB	0.25	12.60	2.52	0.0108	19.2539	1.53	0.31
		Unidad 4 Fase AB	0.25	12.90	2.58	0.0089	15.9571	1.24	0.25
		Unidad 5 Fase AB	0.25	13.30	2.66	0.0109	19.4219	1.46	0.29
		Unidad 6 Fase C	0.25	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.00	0.00
		Unidad 7 Fase C	0.25	2.90	0.58	0.0000	0.0000	0.00	0.00
		Unidad 8 Fase C	0.25	11.90	2.38	0.0120	21.5167	1.81	0.37
		Unidad 9 Fase C	0.25	13.10	2.62	0.0110	19.7210	1.51	0.30
		Unidad 10 Fase C	0.25	12.20	2.44	0.0109	19.4838	1.60	0.33
Túnel Fase AB	44	Inico transición	0.25	15.30	3.06	0.0109	19.4219	1.27	0.23
	49	Fin transición	0.3335	15.90	3.18	0.0523	93.4840	4.41	0.79
	54	Inico cuenco	0.3335	12.10	2.42	0.0523	93.4840	5.79	1.19
	55	Rampa 1 cuenco	0.3335	27.00	5.40	0.0523	93.4840	2.60	0.36
	56	Rampa 2 cuenco	0.3335	27.20	5.44	0.0523	93.4840	2.58	0.35
	57	Fin cuenco	0.3335	2.20	0.44	0	0	0.00	0.00
	58	Vertedero	0.3335	2.30	0.46	0	0	0.00	0.00
Túnel Fase C	15	Inico transición	0.3335	13.20	2.64	0.0109	19.4838	1.11	0.22
	20	Fin transición	0.3335	7.40	1.48	0.0339	60.7216	6.15	1.61
	23	Inico cuenco	0.3335	8.40	1.68	0.0339	60.7216	5.42	1.33
	24	Rampa 1 cuenco	0.3335	24.50	4.90	0.0339	60.7216	1.86	0.27
	25	Rampa 2 cuenco	0.3335	29.20	5.84	0.0339	60.7216	1.56	0.21
	26	Fin cuenco	0.3335	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
	28	Vertedero	0.3335	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Túnel C1	60	Centro	0.3335	27.30	5.46	0.0862	154.2055	4.23	0.58
Túnel Descarga C.I	61	Inicio túnel	0.35	27.50	5.50	0.0862	154.2055	4.01	0.55
	65	Inicio transición	0.35	28.20	5.64	0.0862	154.2055	3.91	0.53
	66	Inico C.I	0.7	33.40	6.68	0.0862	154.2055	1.65	0.20
	67	Verted. C.I	0.7	71.90	14.38	0.0862	154.2055	0.77	0.06

TABLA N° 7.1 Variables hidráulicas medidas y calculadas para la prueba ensayada con las modificaciones realizadas en el diseño original

Para mantener el cambio de diseño, fue necesario cambiar las pendientes de las rampas que unen las fases AB y C con el túnel de interconexión. Éstas rampas de mayor longitud que la del diseño original provocaron un resalto hidráulico ahogado en los cuencos que producía gran turbulencia a lo largo del túnel de interconexión (ver fotografías 7.1 y 7.2). El flujo llega a la cámara muy inestable.



FOTOGRAFÍA N° 7.1. Resalto hidráulico en la rampa de la Fase AB



FOTOGRAFÍA N° 7.2. Turbulencia transmitida hacia aguas abajo del resalto hidráulico

Se concluye que el diseño original era el más recomendable, sin embargo, es necesario optimizar el diseño definitivo para garantizar un buen comportamiento del flujo.

### 7.3 OPTIMIZACIÓN DEL CAMBIO DE DISEÑO

Los ensayos realizados con el nuevo diseño mostraron fenómenos desfavorables para el transporte del flujo a través de las obras de interconexión. A pesar de que el nivel de agua en los canales de las fases AB y C y en la cámara aumentó por la elevación de la cota del vertedero de descarga intermedia, el cambio de pendiente del túnel de interconexión y las nuevas rampas de los cuencos disipadoras provocaron mayor generación de ondas que se transmitían a la cámara.

Para optimizar el nuevo diseño se realizan varias pruebas expeditivas con el objeto de mejorar la conducción del flujo (ver anexo 11 tablas y gráficos y anexo plano 6). Estas pruebas son:

#### Rompeolas:

- Colocación de un rompeolas en la entrada de la cámara.
- Variación del nivel de la solera del rompeolas entre las cotas 1308.5, 1309.0 y 1309.5.
- Colocación de dos rompeolas, uno en la entrada a la cámara y otro al inicio de la transición de entrada a la cámara.
- Colocación de dos rompeolas, el primero 0.50m de la entrada a la cámara y otro separado 0.50m del primero.
- Colocación de dos rompeolas, el primero 0.50m de la entrada a la cámara y otro separado 1.50m del primero.

#### Bandejas disipadoras:

- Variando el diámetro de los orificios (4 y 5 cm).
- Variando la inclinación de la bandeja. (8, 13 y 17 grados)

#### 7.2.1 PRUEBAS CON ROMPEOLAS

Al realizar ensayos expeditivos en el diseño final para una diferente gama de caudales (altos, medios y bajos), se observó que el nivel de agua en la cámara de interconexión no se mantenía estable, generándose ondas que iban

incrementándose a medida que el nivel de agua en la cámara decrecía. Esta inestabilidad de flujo era más notoria para niveles iguales o menores a la cota 1311msnm. Es necesaria la utilización de una estructura hidráulica colocada en la cámara que mejore este comportamiento.

El CGM diseña de un rompeolas tipo L basándose en literatura técnica de estudios experimentales con este tipo de estructuras. Dicha investigación establece que la mayor disipación de olas se produce cuando la sumergencia ( $h'$ ) alcanza un 33% del calado medido hacia aguas arriba; y que el porcentaje de reducción de olas depende de la longitud ( $L$ ) del rompeolas. (Ver anexos cálculos).

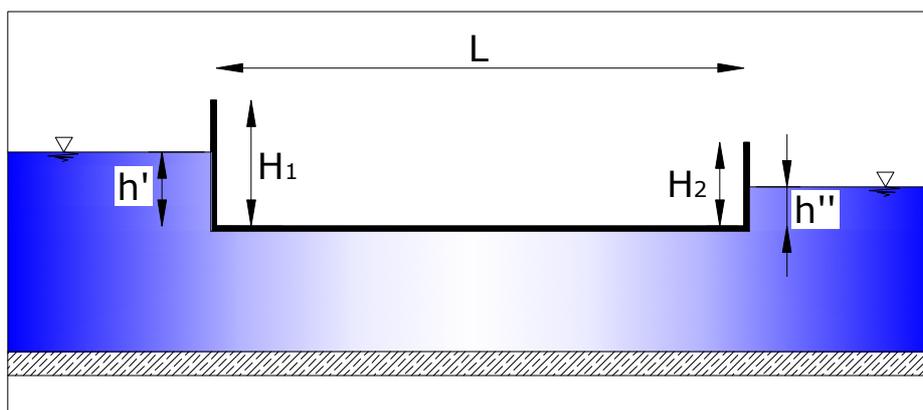


GRÁFICO N° 7.1

Geometría del rompeolas

$$h' = 0.33y \quad (6.1)$$

$$h'' = 0.11D_2 \quad (6.2)$$

$$L = 2D_2 \text{ a } 2.5D_2 \quad (6.3)$$

Donde:

$h'$  = Sumergencia hacia aguas arriba del rompeolas

$h''$  = Sumergencia hacia aguas abajo del rompeolas

$H_1$  = Altura de cresta superior del rompeolas

$H_2$  = Altura de cresta inferior del rompeolas

$L$  = Longitud del rompeolas

$y$  = Calado aguas arriba de la estructura rompeolas

$D_2$  = Calado aguas abajo de la estructura rompeolas

De acuerdo a los datos medidos en laboratorio para el caudal de diseño de Sopladora ( $150\text{m}^3/\text{s}$ ), se obtuvo los siguientes cálculos:

$$y = 28\text{cm}$$

$$D_2 = 66\text{cm}$$

$$h' = 9.2\text{cm}$$

$$h'' = 7.3\text{cm}$$

$$L = 1.32\text{m a } 1.65\text{m}$$

Por fines constructivos la geometría de la estructura rompeolas es:

$$H_1 = 12\text{cm}$$

$$H_2 = 8\text{cm}$$

$$L = 50\text{cm (se colocará dos rompeolas)}$$

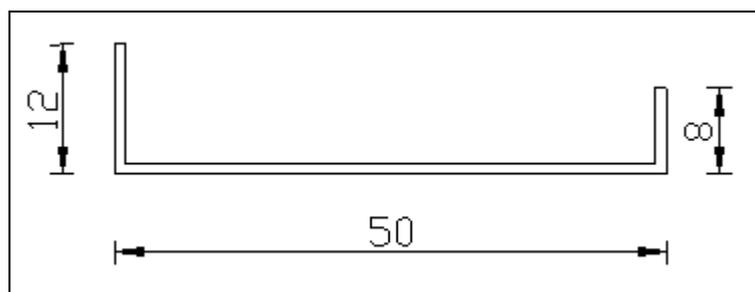


GRÁFICO N° 7.2 Dimensionamiento del Rompeolas

Para comprobar el funcionamiento del rompeolas para un caudal de  $150\text{m}^3/\text{s}$  prototipo se realizaron pruebas expeditivas. Se estabilizó el nivel de agua en la cámara de interconexión en la cota 1311msnm (cota mínima), variando la cota inferior del rompeolas en los niveles 1308.5, 1309 y 1309.5msnm. Los resultados de estas pruebas se muestran en la tabla 7.2.

COTA SOLERA	ALTURA DE OLAS (MODELO)		ALTURA DE OLAS (PROTOTIPO)	
	AGUAS ARRIBA	AGUAS ABAJO	AGUAS ARRIBA	AGUAS ABAJO
msnm	cm	cm	m	m
1308.5	7	2.5	1.4	0.5
1309	6	3	1.2	0.6
1309.5	9	2	1.8	0.4

TABLA N° 7.2 Variación de la cota de la solera del rompeolas vs altura de olas

La tabla 7.2 muestra que la menor oscilación de olas se produce cuando el rompeolas se ubica en la cota 1309.5. (Ver anexo 7.1 de fotografías).

Con el propósito de mejorar el funcionamiento hidráulico de la transición de entrada a la cámara, se coloca un rompeolas adicional ubicado al inicio de la misma. Los resultados obtenidos son desfavorables para los fines deseados.. La altura de ondas generadas es mayor a la obtenida cuando se coloca un rompeolas a la entrada a la cámara en la cota 1309.5. Este rompeolas adicional reduce el área hidráulica en la entrada a la cámara provocando aceleración del flujo, aumentando la velocidad y causando mayor inestabilidad del flujo entre los dos rompeolas, como se observa en la fotografía 7.3.



FOTOGRAFÍA N° 7.3. Turbulencia entre los dos rompeolas la transición de entrada a la cámara

### 7.2.2 PRUEBAS COLOCANDO DOS ROMPE OLAS EN LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN

Determinado el nivel de la solera más favorable para la colocación del rompeolas (1309.5msnm), se realizan pruebas con una estructura adicional en la cámara de interconexión. El uso de dos rompeolas tiene por objeto respetar la longitud de diseño ( $L=2D_2$  a  $L=2.5D_2$  –  $1.32m < L < 1.65m$ ). El rompeolas adicional tiene la misma geometría y dimensiones que el primero.

El caudal a ensayar es de  $150\text{m}^3/\text{s}$  manteniendo el nivel de agua en la cámara de interconexión en la cota 1311msnm. La primera estructura se coloca a 0.5m aguas abajo del inicio de la cámara, separada de la segunda una distancia de 0.5m y 1.5m, como se observa en los gráficos 7.3 y 7.4.

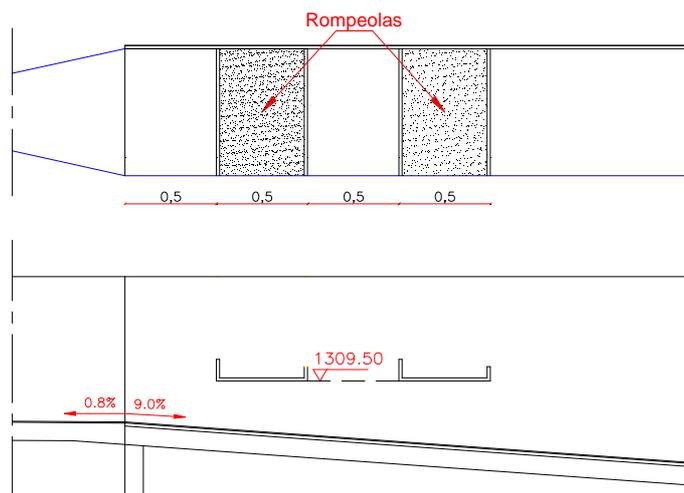


GRÁFICO N° 7.3 Rompeolas separados 0.5m

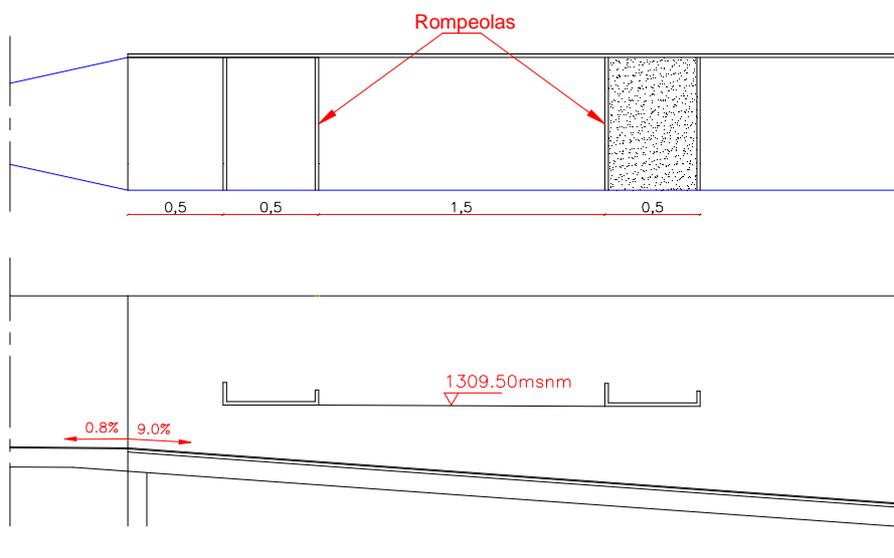


GRÁFICO N° 7.4 Rompeolas separados 1.5m

Cuando la separación de los rompeolas es 0.5m se tiene mayor variación de nivel de la masa líquida. A una separación mayor, esta variación disminuye. Los resultados se muestran en la tabla 7.3:

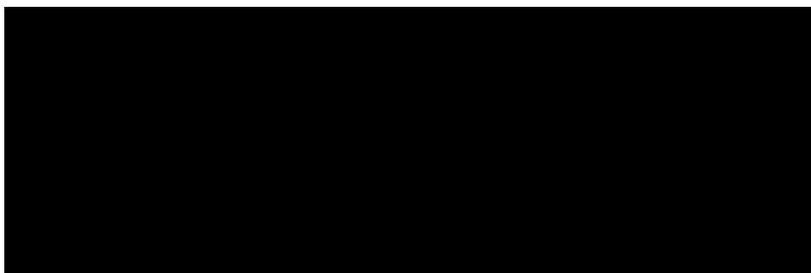


TABLA N° 7.3 Variación del nivel de la masa líquida en la cámara de interconexión vs separación de rompeolas

Comparando las tablas 7.2 y 7.3, se observa que la variación del nivel en la cámara disminuye en un 40% utilizando dos rompeolas en lugar de uno.

Los rompeolas colocados en la cámara de interconexión a una cota de 1309.5msnm y separados una distancia de 1.5m logran estabilizar el flujo y disminuyen la vorticidad en la cámara. Para cotas menores a 1312msnm se forman vórtices esporádicos de poca intensidad que logran ingresar aire a la tubería de carga.

### **7.2.3 PRUEBAS COLOCANDO DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO BANDEJA CON ORIFICIOS EN LOS CUENCOS DE LAS FASES AB Y C**

La colocación de bandejas tipo orificio tiene por objetivo disipar la energía generada en la unión de las fases AB y C, y disminuir la turbulencia que se transmite aguas abajo hasta la cámara de interconexión. Las bandejas además elevarán el nivel hacia aguas arriba, trabajando como sección de control al inicio de los cuencos.

El diseño del disipador fue entregado por los consultores, calculado en base a estudios realizados por el Instituto de Hidráulica de la universidad de Napoli publicados en el libro "Dissipatori a Griglia di Fondo". Esta investigación

demuestra que la capacidad de transporte de caudal depende de las características geométricas de las estructuras disipadoras (longitud, ancho e inclinación de la bandeja; número, diámetro y separación de los orificios).

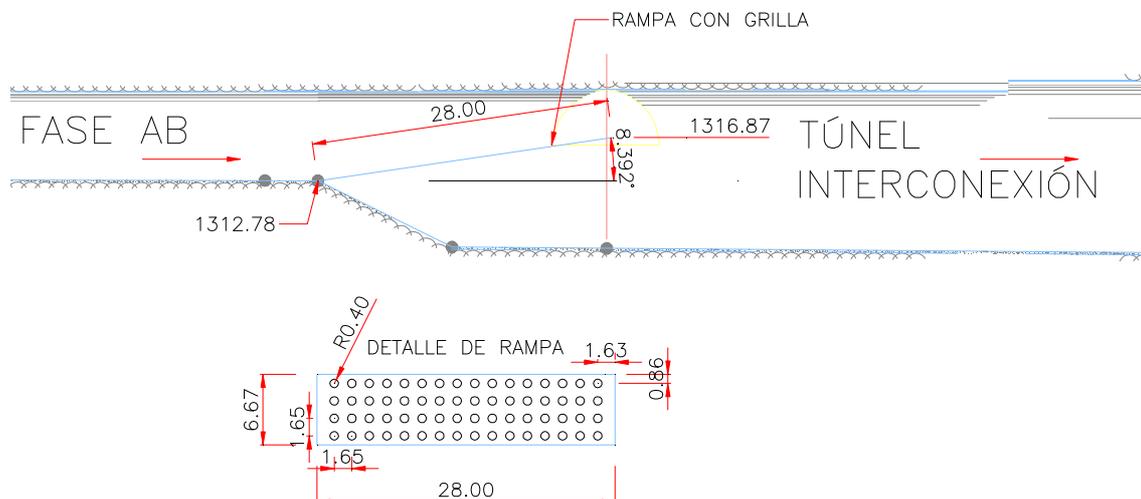


GRÁFICO N° 7.5 Estructura disipadora propuesta por CGM

El gráfico 7.5 muestra el diseño de la estructura disipadora propuesta por la consultoría (ver anexos cálculos).

Las dimensiones del disipador no satisfacen las características del modelo. La longitud de 28m del disipador correspondiente a 1.4m modelo, no es posible colocarla por cuanto excede la extensión admisible de 90cm (18m prototipo) entre el punto 54 y el punto de tangencia de unión de las dos fases.

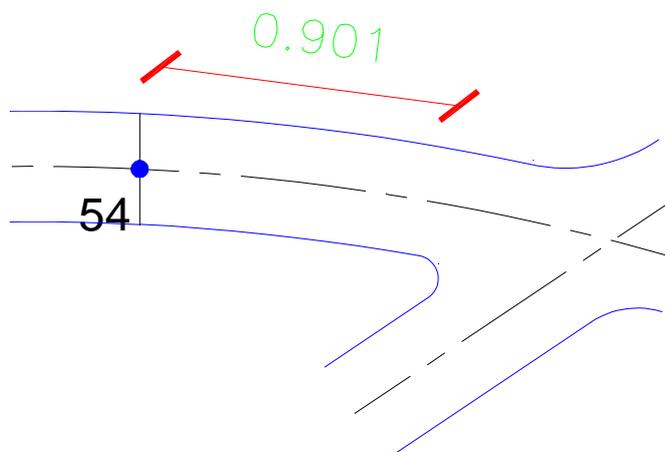


GRÁFICO N° 7.6 Distancia admisible para la colocación del disipador

Las dimensiones prototipo adoptadas para las bandejas fueron:

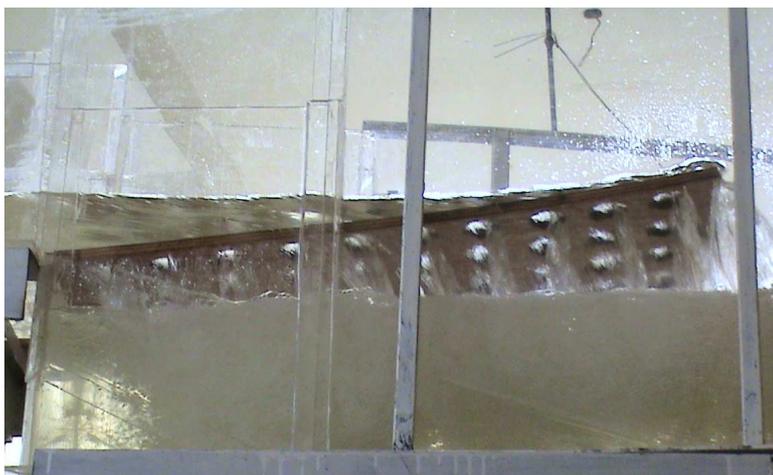
Ancho = 6.67m

Largo = 17.2m

Diámetro del orificio = 0.8m

Número de orificios = 40

Para estas pruebas se experimentó con diferentes diámetros de orificios: 4 y 5cm (modelo) correspondientes a 0.8 y 1m (prototipo) respectivamente. Observamos que la bandeja de orificios de diámetro 4cm disipa mejor la energía y produce un remanso hacia aguas arriba haciendo que el nivel del agua se incremente y el flujo trabaje en régimen subcrítico. Los orificios de 5cm trabajan parcialmente a diferencia de los de 4cm que funcionan a toda su capacidad.



FOTOGRAFÍA N° 7.4. Funcionamiento del dissipador con orificios de 5cm de diámetro



FOTOGRAFÍA N° 7.5. Funcionamiento del dissipador con orificios de 5cm de diámetro

Las tablas 7.4 y 7.5 muestran los valores medidos de calados hacia aguas arriba de los disipadores tipo bandeja y los valores de las diferentes variables hidráulicas para las alternativas ensayadas. Las velocidades en la Fase AB con el disipador de 4cm de diámetro de orificio son menores a las del disipador de 5cm. De igual manera la cota en la salida de las unidades es mayor en un 5% promedio con el disipador de 4cm.

Fase	Punto de Medición	Descripción	Ancho (m)	Diámetro del orificio = 4cm (Modelo)					
				Calado Modelo (cm)	Calado Prototipo (m)	Caudal Modelo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad (m/s)	Froude Fr
Unidades de Entrada al modelo		Unidad 1 Fase AB	0.25	13.30	2.66	0.0113	20.3	1.53	0.30
		Unidad 2 Fase AB	0.25	12.90	2.58	0.0120	21.5	1.66	0.33
		Unidad 3 Fase AB	0.25	12.60	2.52	0.0112	20.0	1.59	0.32
		Unidad 4 Fase AB	0.25	11.30	2.26	0.0091	16.3	1.45	0.31
		Unidad 5 Fase AB	0.25	10.80	2.16	0.0111	19.9	1.85	0.40
Túnel Fase AB	44	Inico transición	0.25	14.50	2.90	0.0111	19.9	1.37	0.26
	49	Fin transición	0.3335	17.00	3.40	0.0548	98.0	4.32	0.75
	54	Inico cuenco	0.3335	19.00	3.80	0.0548	98.0	3.87	0.63
	55	Rampa 1 cuenco	0.3335	26.00	5.20	0.0548	98.0	2.83	0.40

TABLA N° 7.4 Variables hidráulicas medidas colocando un disipador tipo bandejas con orificios de diámetro 4cm modelo – 80cm prototipo, para un caudal de 150m<sup>3</sup>/s prototipo

Fase	Punto de Medición	Descripción	Ancho (m)	Diámetro del orificio = 5cm (Modelo)					
				Calado Modelo (cm)	Calado Prototipo (m)	Caudal Modelo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Unidades de Entrada al modelo		Unidad 1 Fase AB	0.25	13.00	2.60	0.0113	20.2944	1.56	0.31
		Unidad 2 Fase AB	0.25	12.20	2.44	0.0120	21.4543	1.76	0.36
		Unidad 3 Fase AB	0.25	11.80	2.36	0.0112	19.9994	1.69	0.35
		Unidad 4 Fase AB	0.25	11.10	2.22	0.0091	16.3490	1.47	0.32
		Unidad 5 Fase AB	0.25	9.90	1.98	0.0111	19.9309	2.01	0.46
Túnel Fase AB	44	Inico transición	0.25	14.50	2.90	0.0111	19.9309	1.37	0.26
	49	Fin transición	0.3335	14.00	2.80	0.0548	98.0279	5.25	1.00
	54	Inico cuenco	0.3335	14.50	2.90	0.0548	98.0279	5.07	0.95
	55	Rampa 1 cuenco	0.3335	27.00	5.40	0.0548	98.0279	2.72	0.37

TABLA N° 7.5 Variables hidráulicas medidas colocando un disipador tipo bandejas con orificios de diámetro 5cm modelo – 1.0m prototipo, para un caudal de 150m<sup>3</sup>/s prototipo

## 7.2.4 PRUEBAS CON DISIPADORES DE ENERGÍA TIPO BANDEJA CON ORIFICIOS, VARIANDO LA INCLINACION DE LA ESTRUCTURA

Una vez seleccionada la estructura tipo bandeja con orificios de 4cm, se varió la inclinación de las bandejas con el objeto de observar la disipación de energía. Se ensayaron diferentes ángulos de inclinación en la estructura: 8, 13 y 17 grados.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente:

RESUMEN DE RESULTADOS - FASE AB							
ALTERNATIVA	ÁNGULO	N° Punto	Cota	Q	LEP	Pérdida	% Pérdida
			Proyecto (m)	Prototipo (m <sup>3</sup> /seg)	(m)	de energía (m)	
A1	17	54	1312.78	93.48	1317.39	5.87	52.09
		55	1306.12	93.48	1311.52		
A2	13	54	1312.78	93.48	1317.10	5.58	49.47
		55	1306.12	93.48	1311.52		
A3	8	54	1312.78	93.48	1317.02	5.07	44.95
		55	1306.12	93.48	1311.95		

TABLA N° 7.6 Cálculo del porcentaje de disipación de energía variando la inclinación de los disipadores tipo bandeja

Donde:

- A1: Inclinación del disipador: 17 grados  
Cota del disipador: 1312.78 a 1317.92
- A2: Inclinación del disipador : 13 grados  
Cota del disipador: 1312.78 a 1316.42
- A3: Inclinación del disipador : 8 grados  
Cota del disipador: 1312.78 a 1314.92

Además del cálculo del porcentaje de disipación de energía respecto al ángulo de inclinación, se midieron valores de nivel de calado hacia aguas arriba de los disipadores. Los resultados obtenidos de estas mediciones se muestran a continuación.

Fase	Punto de Medición	Descripción	Ancho (m)	ALTERNATIVA A1					
				Calado Modelo (cm)	Calado Prototipo (m)	Caudal Modelo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Unidades de Entrada al modelo		Unidad 1 Fase AB	0.25	14.80	2.96	0.0116	20.7	1.40	0.26
		Unidad 2 Fase AB	0.25	14.50	2.90	0.0117	20.9	1.44	0.27
		Unidad 3 Fase AB	0.25	14.80	2.96	0.0118	21.0	1.42	0.26
		Unidad 4 Fase AB	0.25	14.60	2.92	0.0092	16.4	1.13	0.21
		Unidad 5 Fase AB	0.25	13.00	2.60	0.0111	19.9	1.53	0.30
Túnel Fase AB	44	Inico transición	0.25	15.00	3.00	0.0111	19.9	1.32	0.24
	49	Fin transición	0.3335	16.00	3.20	0.0553	99.0	4.64	0.83
	54	Inico cuenco	0.3335	19.90	3.98	0.0553	99.0	3.73	0.60
	55	Bajada cuenco 1	0.3335	25.00	5.00	0.0553	99.0	2.97	0.42

TABLA N° 7.7 Medición de calados hacia aguas arriba de los disipadores tipo bandeja. Alternativa A1.  
Caudal 100m<sup>3</sup>/s – Fase AB

Fase	Punto de Medición	Descripción	Ancho (m)	ALTERNATIVA A2					
				Calado Modelo (cm)	Calado Prototipo (m)	Caudal Modelo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Unidades de Entrada al modelo		Unidad 1 Fase AB	0.25	13.00	2.60	0.0116	20.7467	1.60	0.32
		Unidad 2 Fase AB	0.25	12.50	2.50	0.0117	20.8871	1.67	0.34
		Unidad 3 Fase AB	0.25	12.00	2.40	0.0118	21.0433	1.75	0.36
		Unidad 4 Fase AB	0.25	11.50	2.30	0.0092	16.4402	1.43	0.30
		Unidad 5 Fase AB	0.25	10.50	2.10	0.0111	19.8626	1.89	0.42
Túnel Fase AB	44	Inico transición	0.25	14.00	2.80	0.0111	19.8626	1.42	0.27
	49	Fin transición	0.3335	15.00	3.00	0.0553	98.9799	4.95	0.91
	54	Inico cuenco	0.3335	17.50	3.50	0.0553	98.9799	4.24	0.72
	55	Bajada cuenco 1	0.3335	25.00	5.00	0.0553	98.9799	2.97	0.42

TABLA N° 7.8 Medición de calados hacia aguas arriba de los disipadores tipo bandeja. Alternativa A2.  
Caudal 100m<sup>3</sup>/s – Fase AB

Fase	Punto de Medición	Descripción	Ancho (m)	ALTERNATIVA A3					
				Calado Modelo (cm)	Calado Prototipo (m)	Caudal Modelo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Veloc (m/s)	Froude Fr
Unidades de Entrada al modelo		Unidad 1 Fase AB	0.25	12.80	2.56	0.0116	20.7467	1.62	0.32
		Unidad 2 Fase AB	0.25	12.20	2.44	0.0117	20.8871	1.71	0.35
		Unidad 3 Fase AB	0.25	12.20	2.44	0.0118	21.0433	1.72	0.35
		Unidad 4 Fase AB	0.25	11.50	2.30	0.0092	16.4402	1.43	0.30
		Unidad 5 Fase AB	0.25	10.50	2.10	0.0111	19.8626	1.89	0.42
Túnel Fase AB	44	Inico transición	0.25	13.80	2.76	0.0111	19.8626	1.44	0.28
	49	Fin transición	0.3335	12.60	2.52	0.0553	98.9799	5.89	1.18
	54	Inico cuenco	0.3335	16.70	3.34	0.0553	98.9799	4.44	0.78
	55	Bajada cuenco 1	0.3335	27.50	5.50	0.0553	98.9799	2.70	0.37

TABLA N° 7.9 Medición de calados hacia aguas arriba de los disipadores tipo bandeja. Alternativa A3.  
Caudal 100m<sup>3</sup>/s – Fase AB

Se determina que la alternativa A1 es la más óptima, disipa mayor porcentaje de energía (52.09%) y produce un incremento de calado hacia aguas arriba mayor que el observado en las alternativas A2 y A3, lo que representa menor velocidad de circulación del flujo. (Ver anexo 7.6 de fotografías).

## 7.4 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN CON EL DISEÑO DEFINITIVO

Concluido el estudio de las diferentes pruebas expeditivas, CGM en mutuo acuerdo con la EPN, deciden el diseño definitivo de las obras de interconexión del proyecto Sopladora. El esquema general de diseño incluye las siguientes obras:

- Profundizaciones o cuencos en los dos túneles de descarga de la Central Molino, fases AB y C, con disipadores de energía tipo bandejas con orificios. Los cuencos bajan perpendiculares de la cota 1312.6msnm a la cota 1306.4msnm. El corte perpendicular en el cuenco es para aprovechar el mayor volumen de agua para la disipación de energía y así proporcionar las condiciones hidráulicas necesarias para el desvío del flujo hacia el túnel de interconexión.
- Un primer tramo de túnel de interconexión denominado Fase C1, que comunica el túnel de descarga de la Fase C de la Central Molino con el túnel que viene desde la Fase AB. Este túnel tiene una longitud de 69.25m entre las abscisas 5.02m y 74.27m , un diámetro de excavación de 6.67m. La pendiente longitudinal es del 0.8% y va desde la cota 1306.5msnm a la cota 1305.94msnm.
- Un segundo tramo de túnel de interconexión denominado Fase ABC, que recoge las aguas procedentes de los dos túneles de descarga de Molino, para conducir las hasta la cámara de interconexión. Tiene una longitud de 97.52m entre las abscisas 74.27m y 171.79m, diámetro de excavación de 7m hasta el inicio de una transición gradual que va desde la abscisa 171.79m hasta 190.87m con una longitud de 19.08m, en donde el diámetro de excavación varía de 7m a 14m. Esta fase va desde la cota 1305.94msnm a la cota 1305msnm al inicio de la cámara de interconexión. La altura promedio es de 13.7m. La pendiente longitudinal es de 0.8% y su clave se mantiene horizontal en la cota 1321msnm.
- Una cámara de interconexión, subterránea, en caverna, de 14m de ancho, 19,20m de altura promedio y 125m de longitud. En el punto más bajo de la solera, arranca el pozo vertical de interconexión que comunica la cámara

con el túnel superior de carga. El vertedero de la descarga intermedia se ubica a la cota 1315.60msnm.

- Dos estructuras rompeolas de 10m de longitud ubicadas en la cámara de interconexión a 10m y 40m del inicio de la cámara.

### **7.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL EN SU FASE FINAL**

El objetivo del estudio experimental en el modelo físico del diseño final de las obras de interconexión entre la Central Molino y la Central Sopladora es comprobar que la nueva geometría de las estructuras hidráulicas rediseñadas garanticen el correcto y eficiente funcionamiento de las obras de interconexión entre las dos centrales.

Entre los objetivos particulares de la investigación se tiene:

- Definir los niveles de la superficie libre del agua en los fosos de cada una de las unidades, a lo largo de las Fase AB y C de Molino y el túnel de interconexión, así como niveles de agua en la cámara de interconexión.
- Conducir el caudal desde Molino a través de las obras de interconexión con flujo tranquilo y entregar apropiadamente las aguas a la cámara de interconexión, para todo el rango de caudales de funcionamiento.
- Verificar el apropiado funcionamiento de la cámara de interconexión bajo las diferentes combinaciones de niveles y caudales de ingreso, determinando además los niveles operativos de la cámara (máximos y mínimos) que permitan el ingreso de los caudales entregados por la Central Molino sin desperdiciar agua en los vertederos de descarga existentes ni por el vertedero propio de la descarga intermedia cuando desde Molino se envían caudales hasta 150m<sup>3</sup>/s.
- Comprobar que las bandejas con orificios disipen correctamente la energía y eleven el nivel hacia aguas arriba en los túneles de descarga de la central Molino.
- Determinar la eficiencia de las estructuras rompeolas colocadas en la cámara de interconexión para tranquilizar y estabilizar el nivel de agua.

- Verificar la eficiencia de la nueva cota del vertedero de descarga intermedia como sección de control hacia aguas arriba.

#### 7.4 PLAN DE PRUEBAS EN LA FASE FINAL

Establecido el diseño definitivo de las obras de interconexión, se define el plan de pruebas a ensayar en el modelo físico para una gama de caudales enviados desde Molino y niveles de agua máximos y mínimos en la cámara de interconexión. La siguiente tabla muestra el plan de pruebas realizadas.

PLAN PRUEBAS FINALES SOPLADORA I				
No	COTA (msnm)	CAUDAL (m <sup>3</sup> /S)		
		Q <sub>AB</sub>	Q <sub>C</sub>	Q <sub>SOPLADORA</sub>
PF1	1315.6	20	0	20
	1312	20	0	20
PF2	1315.6	60	0	60
	1312	60	0	60
PF3	1315.6	80	0	80
	1312	80	0	80
PF4	1315.6	100	0	100
	1312	100	0	100
PF5	1315.6	100	20	120
	1312	100	20	120
PF6	1315.6	0	20	20
	1312	0	20	20
PF7	1315.6	0	60	60
	1312	0	60	60
PF8	1315.6	0	80	80
	1312	0	80	80
PF9	1315.6	0	100	100
	1312	0	100	100
PF10	1315.6	20	100	120
	1312	20	100	120
PF11	1315.6	50	100	150
	1312	50	100	150
PF12		80	100	150
PF13	1315.6	100	50	150
	1312	100	50	150
PF14		100	80	150
PF15		100	100	150

TABLA N° 7.10 Plan de pruebas finales

Como las crestas de los vertederos de descarga de las fases AB y C se encuentran en las cotas 1315.25 y 1315.40msnm, para caudales enviados desde Molino menores e iguales al caudal de diseño de Sopladora, no es posible colocar el nivel de agua en la cámara de interconexión en la cota 1315.60msnm, sin que por los vertederos de las fases AB y C vierta agua. Por tanto para caudales hasta de  $150\text{m}^3/\text{s}$ , el número de prueba denominado PF# 1315.6 corresponde al mayor nivel de agua alcanzado en la cámara de interconexión sin que por los vertederos de descarga vierta agua.

## CAPÍTULO 8

### ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO DEL DISEÑO RECOMENDADO

#### 8.1 ANÁLISIS DE LAS OBSERVACIONES CON EL DISEÑO DEFINITIVO

Según el plan de pruebas descrito en el capítulo anterior, es necesario detallar cada uno de los caudales ensayos. En el anexo 12 de tablas y gráficos, se indica los valores de calados, caudales, velocidades y números de Froude calculados en los diferentes puntos de interés del modelo. El anexo 8 de fotografías muestra el comportamiento del flujo a lo largo de las obras de interconexión para los diferentes caudales ensayados.

**PF 1:  $Q_{AB} = 20m^3/s$  y  $Q_C = 0m^3/s$**

**Fase AB.-** A la salida de la unidad 5 se tiende régimen crítico para el nivel mínimo de operación de la cámara 1312msnm y supercrítico para el nivel de 1315.6msnm. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al inicio de la transición (3.39m/s). Presencia de ondas cortas desde el fin de la transición.

**Fase C.-** En esta prueba la fase C no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF1 1315.6 el nivel alcanza la cota 1314.74msnm sin que se desborde el fluido por ningún vertedero (ver anexo fotografías 66-85).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

<b>PF1 1312</b>					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	44	21.01	1.24	3.39	0.97
C	23	0.00	0.00	0.00	0.00
C1	60	0.00	5.76	0.00	0.00
ABC	61	21.01	5.90	0.51	0.07
C.I	67	21.01	14.80	0.10	0.01

(a)

<b>PF1 1315.6</b>					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	44	21.01	1.04	4.04	1.26
C	23	0.00	2.08	0.00	0.00
C1	60	0.00	8.70	0.00	0.00
ABC	61	21.01	8.86	0.34	0.04
C.I	67	21.01	17.74	0.08	0.01

(b)

TABLA 8.1 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF1 (a) 1312, (b) 1315.6

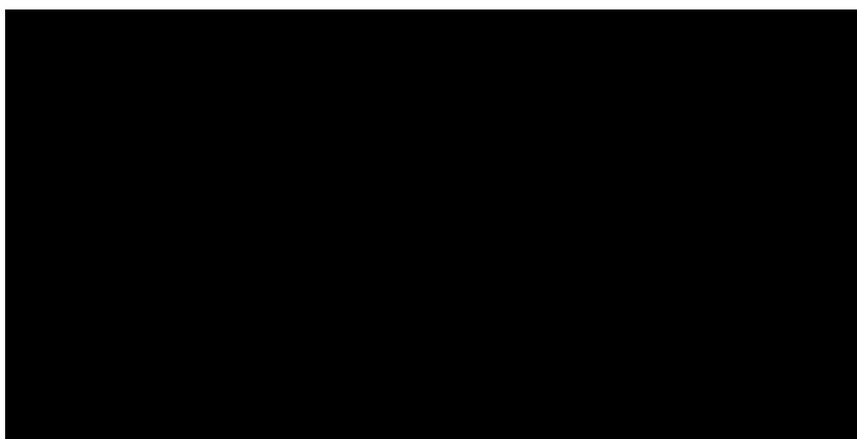


TABLA 8.2 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF1

**PF 2:  $Q_{AB} = 60m^3/s$  y  $Q_C = 0m^3/s$**

**Fase AB.-** Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.48m/s). Presencia de ondas cortas desde el fin de la transición.

**Fase C.-** En esta prueba la fase C no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF1 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1314.68 msnm (ver anexo fotografías 86-97).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF2 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	59.76	3.62	2.48	0.42
C	23	0.00	0.00	0.00	0.00
C1	60	0.00	5.78	0.00	0.00
ABC	61	59.76	5.84	1.46	0.19
C.I	67	59.76	14.80	0.29	0.02

(a)

PF2 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	59.76	4.06	2.21	0.35
C	23	0.00	2.04	0.00	0.00
C1	60	0.00	8.62	0.00	0.00
ABC	61	59.76	8.74	0.98	0.11
C.I	67	59.76	17.68	0.24	0.02

(b)

TABLA 8.3 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF2 (a) 1312, (b) 1315.6

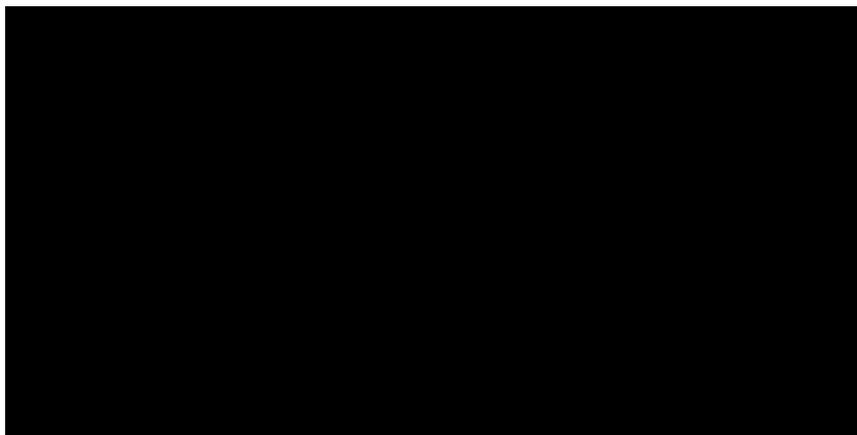


TABLA 8.4 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF2

**PF 3:  $Q_{AB} = 80m^3/s$  y  $Q_C = 0m^3/s$**

**Fase AB.-** Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al ifinal de la transición (2.70m/s). Presencia de ondas cortas desde el fin de la transición.

**Fase C.-** En esta prueba la fase C no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se generan ondas en la cámara de interconexión trabajando adecuadamente. El nivel de agua alcanzado en la cámara en la prueba PF1 1315.6 está en la cota 1314.76msnm (ver anexo fotografías 98-108).

A continuación se indican los valores medidos y calculados de las diferentes variables hidráulicas y las cotas de los niveles de agua en los fosos de las unidades:

PF3 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	N° de Froude
AB	49	80.06	4.44	2.70	0.41
C	23	0.00	0.00	0.00	0.00
C1	60	0.00	5.80	0.00	0.00
ABC	61	80.06	5.76	1.99	0.26
C.I	67	80.06	14.80	0.39	0.03

(a)

PF3 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	N° de Froude
AB	49	80.06	4.80	2.50	0.36
C	23	0.00	2.08	0.00	0.00
C1	60	0.00	8.70	0.00	0.00
ABC	61	80.06	8.78	1.30	0.14
C.I	67	80.06	17.76	0.32	0.02

(b)

TABLA 8.5 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF3 (a) 1312, (b) 1315.6

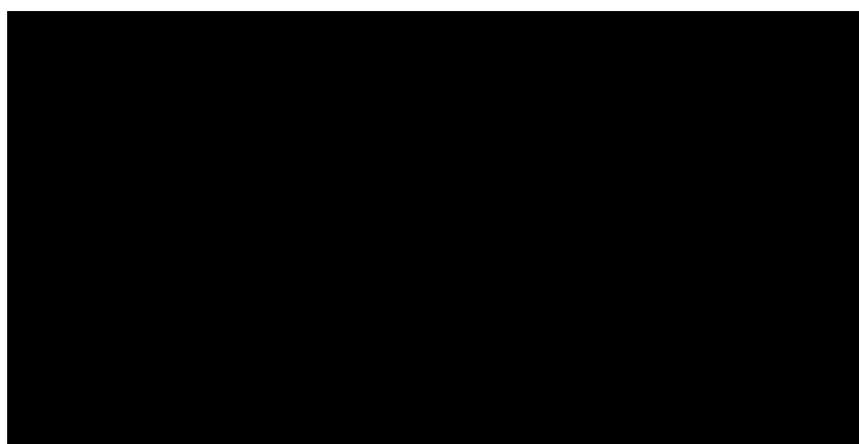


TABLA 8.6 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF3

**PF 4:  $Q_{AB} = 100\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 0\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** El régimen del flujo en esta fase es subcrítico. Todas las unidades de salida están completamente inundadas. El fenómeno es el mismo para las dos cotas de nivel de estabilización en la cámara. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.83m/s).

**Fase C.-** En esta prueba la fase C no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C1.-** La bandeja de orificios cumple a perfección su objetivo haciendo que se gaste la mayor cantidad de energía en los colchones de disipación. Las velocidades generadas son muy bajas.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la prueba PF4 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1314.7msnm, nivel muy similar a las pruebas anteriores (ver anexo fotografías 109-117).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF4 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	99.42	5.26	2.83	0.39
C	23	0.00	0.00	0.00	0.00
C1	60	0.00	5.66	0.00	0.00
ABC	61	99.42	5.48	2.59	0.35
C.I (Verted.	67	99.42	14.72	0.48	0.04

(a)

PF4 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	99.42	5.46	2.73	0.37
C	23	0.00	2.02	0.00	0.00
C1	60	0.00	8.64	0.00	0.00
ABC	61	99.42	8.68	1.64	0.18
C.I	67	99.42	17.70	0.40	0.03

(b)

TABLA 8.7 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF4 (a) 1312, (b) 1315.6

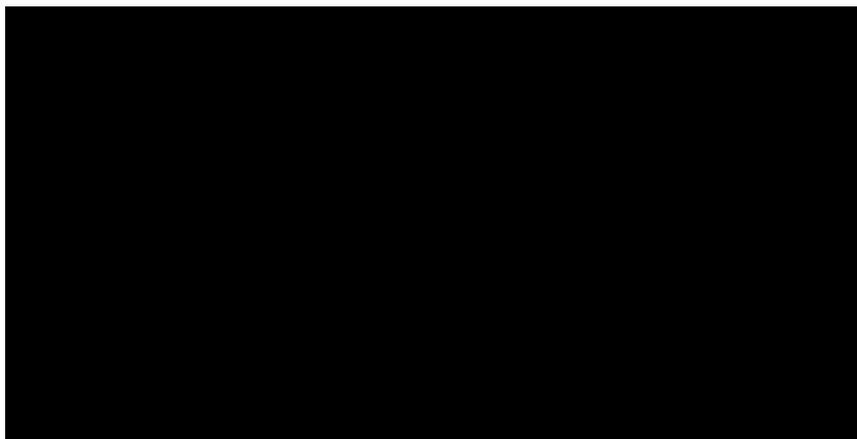


TABLA 8.8 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF4

**PF 5:  $Q_{AB} = 100m^3/s$  y  $Q_C = 20m^3/s$**

**Fase AB.-** El régimen del flujo en esta fase es subcrítico. Todas las unidades de salida están completamente inundadas. El fenómeno es el mismo para las dos cotas de nivel de estabilización en la cámara. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al fin de la transición (2.89m/s).

**Fase C.-** El flujo es subcrítico, excepto en la salida de la unidad 10 que tiende a ser crítico para la cota 1315.60msnm y es supercrítico 1312msnm. La máxima velocidad se produce a la salida de transición (4.55m/s).

**Fase C1.-** La bandeja de orificios en la fase AB cumple a perfección su objetivo haciendo que se gaste la mayor cantidad de energía en los colchones de disipación y elevan el nivel aguas arriba hasta una cota de 1318.78msnm a la salida de las unidades. Las velocidades generadas son muy bajas.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF5 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1315.30msnm sin que se desborde el agua por ningún vertedero (ver anexo fotografías 118-128).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF5 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	N° de Froude
AB	49	99.42	5.16	2.89	0.41
C	20	20.03	0.66	4.55	1.79
C1	60	20.03	5.90	0.51	0.07
ABC	61	119.45	5.56	3.07	0.42
C.I	67	119.45	14.94	0.57	0.05

(a)

PF5 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	N° de Froude
AB	49	99.42	5.24	2.84	0.40
C	15	20.03	1.20	3.34	0.97
C1	60	20.03	9.22	0.33	0.03
ABC	61	119.45	9.22	1.85	0.19
C.I	67	119.45	18.30	0.47	0.03

(b)

TABLA 8.9 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF5 (a) 1312, (b) 1315.6

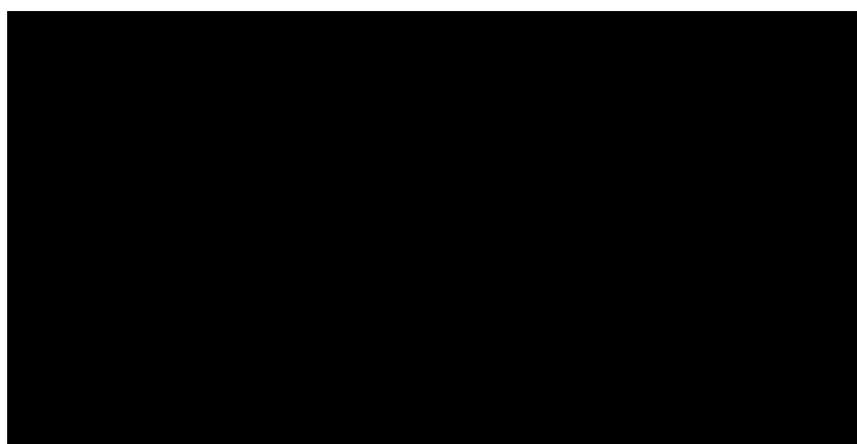


TABLA 8.10 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF5

**PF 6:  $Q_{AB} = 0\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 20\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** En esta prueba la fase AB no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C.-** El flujo circula a régimen subcrítico, excepto en la salida de la unidad 10 que es supercrítico para la cota 1312, con una velocidad máxima de 5m/s.

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF6 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1314.94msnm sin que se desborde el agua por ningún vertedero (ver anexo fotografías 129-139).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF6 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	54	0.00	0.00	0.00	0.00
C	20	20.03	0.60	5.00	2.06
C1	60	20.03	5.98	0.50	0.07
ABC	61	20.03	6.14	0.47	0.06
C.I	67	20.03	15.00	0.10	0.01

(a)

PF6 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	54	0.00	2.32	0.00	0.00
C	15	20.03	1.40	2.86	0.77
C1	60	20.03	9.12	0.33	0.03
ABC	61	20.03	9.08	0.32	0.03
C.I	67	20.03	17.94	0.08	0.01

(b)

TABLA 8.11 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF6 (a) 1312, (b) 1315.6

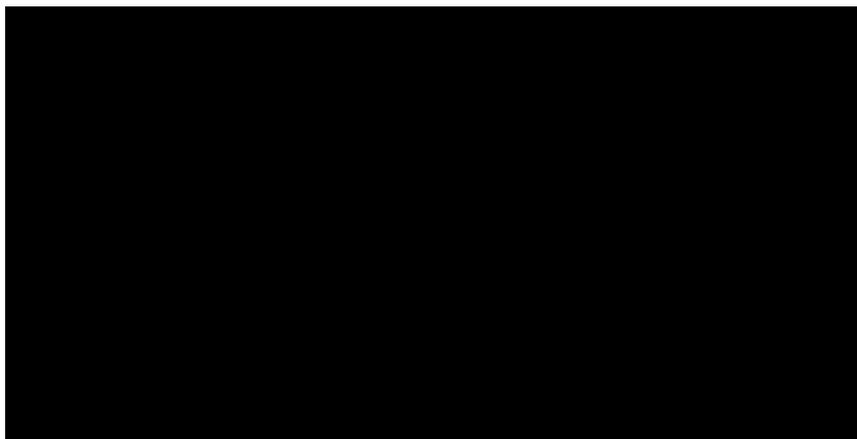


TABLA 8.12 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF6

**PF 7:  $Q_{AB} = 0m^3/s$  y  $Q_C = 60m^3/s$**

**Fase AB.-** En esta prueba la fase AB no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C.-** Las velocidades son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.66m/s). El flujo circula a régimen subcrítico,

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF7 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1315.04msnm (ver anexo fotografías 140-148).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF7 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	N° de Froude
AB	54	0.00	0.00	0.00	0.00
C	20	59.59	3.36	2.66	0.46
C1	60	59.59	5.90	1.51	0.20
ABC	61	59.59	5.92	1.44	0.19
C.I	67	59.59	14.90	0.29	0.02

(a)

PF7 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	N° de Froude
AB	54	0.00	2.36	0.00	0.00
C	20	59.59	3.70	2.41	0.40
C1	60	59.59	9.14	0.98	0.10
ABC	61	59.59	9.12	0.93	0.10
C.I	67	59.59	18.04	0.24	0.02

(b)

TABLA 8.13 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF7 (a) 1312, (b) 1315.6

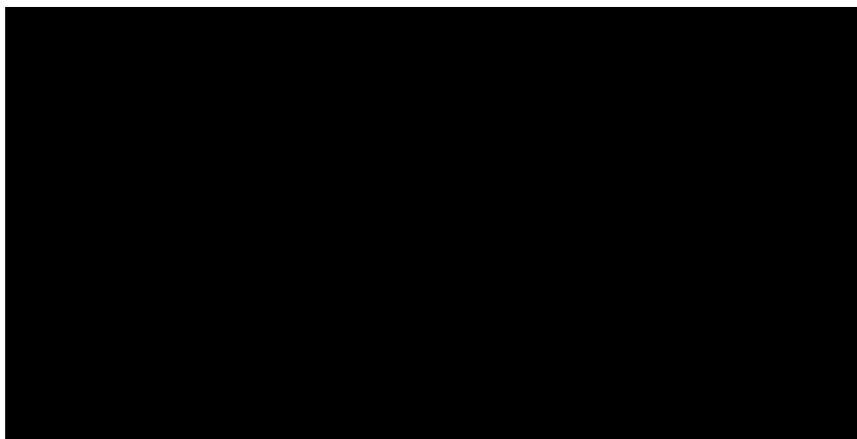


TABLA 8.14 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF7

**PF 8:  $Q_{AB} = 0\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 80\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** En esta prueba la fase AB no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C.-** Las velocidades son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.86m/s). El flujo circula a régimen subcrítico,

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se generan ondas en la cámara de interconexión trabajando adecuadamente. El nivel de agua alcanzado en la cámara en la prueba PF8 1315.6 está en la cota 1315.02msnm (ver anexo fotografías 149-157).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF8 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	54	0.00	0.00	0.00	0.00
C	20	80.76	4.24	2.86	0.44
C1	60	80.76	6.10	1.98	0.26
ABC	61	80.76	6.00	1.92	0.25
C.I	67	80.76	15.00	0.38	0.03

(a)

PF8 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	54	0.00	2.44	0.00	0.00
C	20	80.76	4.50	2.69	0.40
C1	60	80.76	8.88	1.36	0.15
ABC	61	80.76	9.04	1.28	0.14
C.I	67	80.76	18.02	0.32	0.02

(b)

TABLA 8.15 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF8 (a) 1312, (b) 1315.6

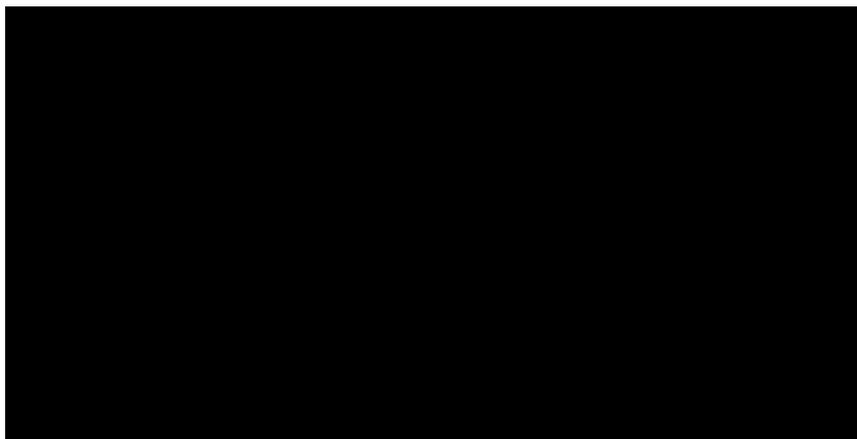


TABLA 8.16 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF8

**PF 9:  $Q_{AB} = 0m^3/s$  y  $Q_C = 100m^3/s$**

**Fase AB.-** En esta prueba la fase AB no entra en funcionamiento, formándose un volumen muerto de agua cuando la cámara se estabilizaba en el nivel máximo de 1315.6msnm.

**Fase C.-** En este caso, el régimen del flujo de esta fase por donde circula el agua es subcrítico. Todas las unidades de salida están completamente inundadas llegando a un nivel máximo 1318.96 en la unidad 9. El fenómeno es el mismo para las dos cotas de nivel de estabilización en la cámara.

**Fase C1.-** La bandeja de orificios de la fase C cumple a perfección su objetivo haciendo que se gaste la mayor cantidad de energía en el colchón de disipación. Las velocidades generadas son muy bajas.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la prueba PF9 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1315.22msnm (ver anexo fotografías 158-168).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF9 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	54	0.00	0.00	0.00	0.00
C	20	99.99	4.80	3.12	0.46
C1	60	99.99	5.90	2.54	0.33
ABC	61	99.99	5.56	2.57	0.35
C.I	67	99.99	14.78	0.48	0.04

(a)

PF9 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	54	0.00	2.72	0.00	0.00
C	20	99.99	4.98	3.01	0.43
C1	60	99.99	9.22	1.63	0.17
ABC	61	99.99	9.26	1.54	0.16
C.I	67	99.99	18.22	0.39	0.03

(b)

TABLA 8.17 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF9 (a) 1312, (b) 1315.6

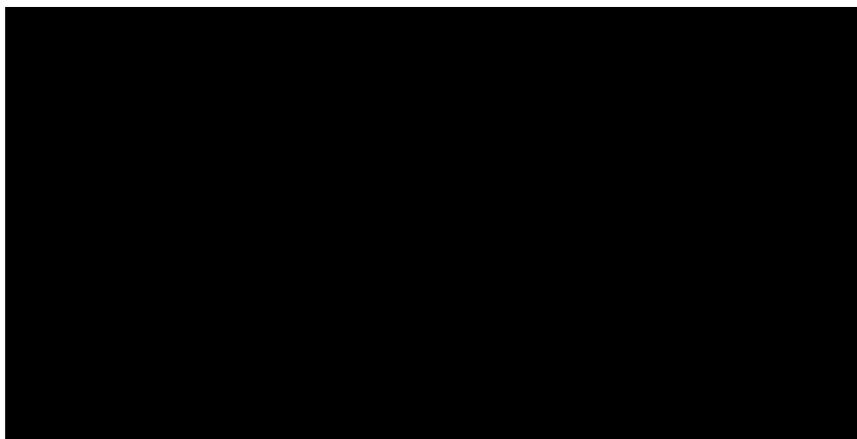


TABLA 8.18 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF9

**PF 10:  $Q_{AB} = 20\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 100\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** En esta fase el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al inicio de la transición (3.19m/s) En la salida de la unidad 5 el régimen del flujo tiende a ser crítico para la prueba 1312 ( $Fr=0.94$ ).

**Fase C.-** En la fase C el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (3.12m/s).

**Fase C1.-** La bandeja de orificios de la fase C cumple a perfección su objetivo haciendo que se gaste la mayor cantidad de energía en el colchón de disipación. Las velocidades generadas son muy bajas.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF10 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1315.06msnm sin que se desborde el agua por ningún vertedero (ver anexo fotografías 169-181).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF10 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	20.73	1.04	2.99	0.94
C	20	99.99	4.80	3.12	0.46
C1	60	99.99	5.90	2.54	0.33
ABC	61	120.71	5.98	2.88	0.38
C.I	67	120.71	14.88	0.58	0.05

(a)

PF10 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	44	20.73	1.30	3.19	0.89
C	20	99.99	4.92	3.05	0.44
C1	60	99.99	9.16	1.64	0.17
ABC	61	120.71	9.28	1.86	0.19
C.I	67	120.71	18.06	0.48	0.04

(b)

TABLA 8.19 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF10 (a) 1312, (b) 1315.6

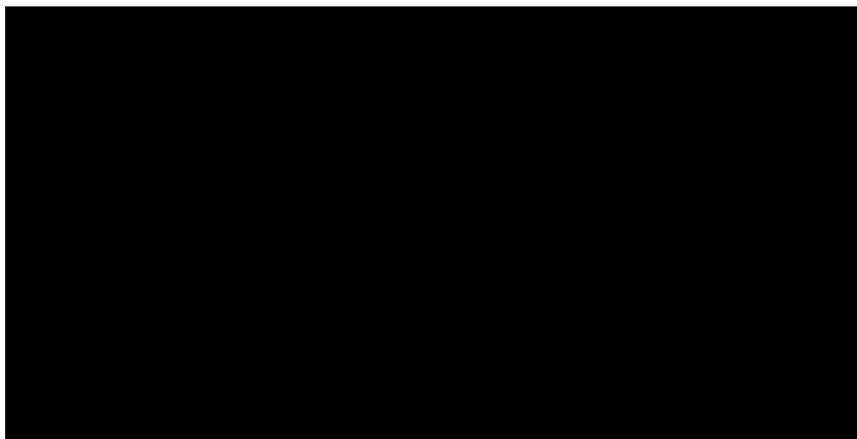


TABLA 8.20 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF10

**PF 11:  $Q_{AB} = 50m^3/s$  y  $Q_C = 100m^3/s$**

**Fase AB.-** En esta fase el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.15m/s)

**Fase C.-** En la fase C el flujo es subcrítico, excepto en la salida de la unidad 5 que tiende a ser crítico para la prueba 1315.60. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (5.17m/s).

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF11 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota 1315.14msnm sin que se desborde el agua por ningún vertedero. (ver anexo fotografías 182-195).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF11 1312					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	50.15	3.50	2.15	0.37
C	20	99.99	4.90	3.06	0.44
C1	60	99.99	6.40	2.34	0.30
ABC	61	150.14	6.24	3.44	0.44
C.I	67	150.14	15.20	0.71	0.06

(a)

PF11 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	50.15	4.06	1.85	0.29
C	20	99.99	2.90	5.17	0.97
C1	60	99.99	8.98	1.67	0.18
ABC	61	150.14	9.00	2.38	0.25
C.I	67	150.14	18.14	0.59	0.04

(b)

TABLA 8.21 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF11 (a) 1312, (b) 1315.6

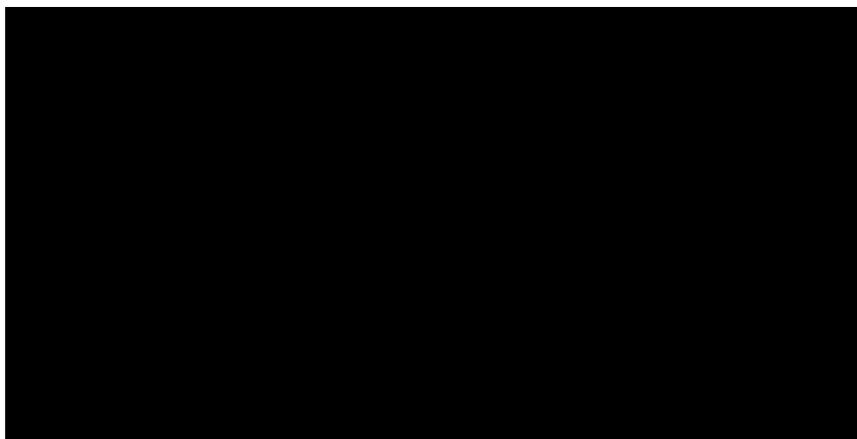


TABLA 8.22 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF11

**PF 12:  $Q_{AB} = 80\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 100\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** En esta fase el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.32m/s)

**Fase C.-** En la fase C el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.32m/s).

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** Puesto que el caudal enviado desde Molino es mayor al captado en Sopladora, el caudal remanente es evacuado por los tres vertederos llegando a una cota del nivel de agua en la cámara de interconexión de 1315.88msnm. Las velocidades en las obras de interconexión en general son bajas. No se forman perturbaciones en la cámara (ver anexo fotografías 196-202).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF12					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	N°de Froude
AB	49	78.58	5.08	2.32	0.33
C	20	99.99	5.04	2.97	0.42
C1	60	99.99	10.36	1.45	0.14
ABC	61	178.57	9.94	2.57	0.26
C.I	67	178.57	18.88	0.68	0.05

TABLA 8.23 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF12

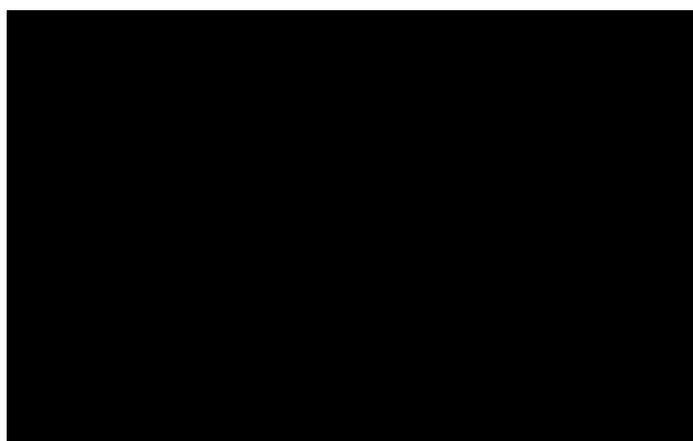


TABLA 8.24 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF12

El caudal remanente correspondiente a  $30\text{m}^3/\text{s}$  es evacuado por los tres vertederos de descarga, es distribuido de la siguiente manera:

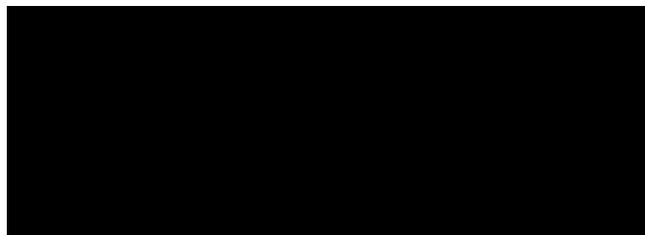


TABLA 8.25 Caudales de salida prueba PF12

**PF 13:  $Q_{AB} = 100\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 50\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** En esta fase el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición ( $3.08\text{m/s}$ )

**Fase C.-** En la fase C el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición ( $2.13\text{m/s}$ ).

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** No se forman perturbaciones ni presencia de vorticidad en la cámara para los dos niveles de agua ensayados. En la segunda prueba denominada PF13 1315.6 el nivel de agua en la cámara de interconexión alcanza la cota  $1315.04\text{msnm}$  sin que se desborde el agua por ningún vertedero (ver anexo fotografías 203-215).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF13 1312					
Fase	Punto	Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	99.46	4.84	3.08	0.45
C	20	49.93	3.52	2.13	0.36
C1	60	49.93	6.20	1.21	0.15
ABC	61	149.39	5.70	3.74	0.50
C.I	67	149.39	15.00	0.71	0.06

(a)

PF13 1315.6					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	99.46	5.04	2.96	0.42
C	20	49.93	3.68	2.03	0.34
C1	60	49.93	9.16	0.82	0.09
ABC	61	149.39	8.90	2.40	0.26
C.I	67	149.39	18.04	0.59	0.04

(b)

TABLA 8.26 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF13 (a) 1312, (b) 1315.6

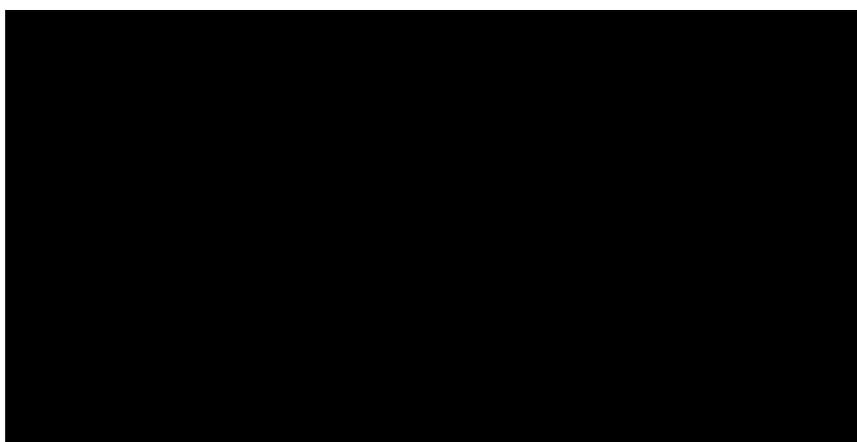


TABLA 8.27 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF13

**PF 14:  $Q_{AB} = 100\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 80\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** En esta fase el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.82m/s)

**Fase C.-** En la fase C el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.53m/s).

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** Puesto que el caudal enviado desde Molino es mayor al captado en Sopladora, el caudal remanente es evacuado por los tres vertederos llegando a una cota del nivel de agua en la cámara de interconexión de 1315.88msnm. Las

velocidades en las obras de interconexión en general son bajas. No se forman perturbaciones en la cámara (ver anexo fotografías 216-224).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF14					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	99.46	5.28	2.82	0.39
C	20	79.40	4.70	2.53	0.37
C1	60	79.40	10.18	1.17	0.12
ABC	61	178.86	9.88	2.59	0.26
C.I	67	178.86	18.88	0.68	0.05

TABLA 8.28 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF14

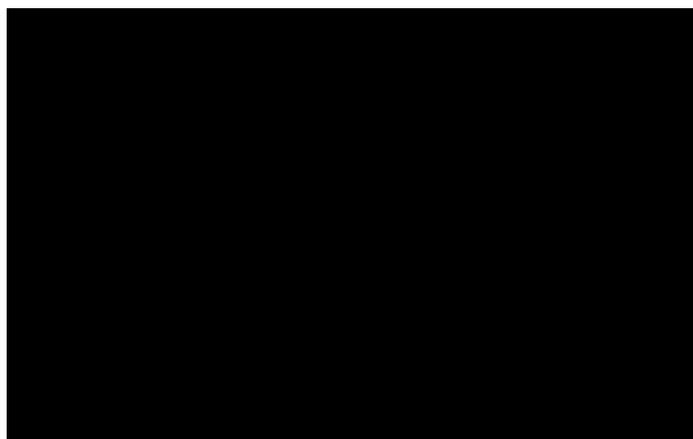


TABLA 8.29 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF14

El caudal remanente correspondiente a 30m<sup>3</sup>/s es evacuado por los tres vertederos de descarga, es distribuido de la siguiente manera:

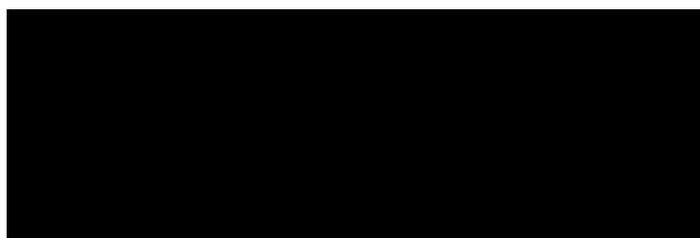


TABLA 8.30 Caudales de salida prueba PF14

**PF 15:  $Q_{AB} = 100\text{m}^3/\text{s}$  y  $Q_C = 100\text{m}^3/\text{s}$**

**Fase AB.-** En esta fase el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.83m/s)

**Fase C.-** En la fase C el flujo es subcrítico. Las velocidades en general son bajas, presentándose la mayor al final de la transición (2.92m/s).

**Fase C1.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**Fase ABC.-** El flujo circula a régimen subcrítico, existe formación de ondas leves.

**C.I.-** Puesto que el caudal enviado desde Molino es mayor al captado en Sopladora, el caudal remanente es evacuado por los tres vertederos llegando a una cota del nivel de agua en la cámara de interconexión de 1316.18msnm. Las velocidades en las obras de interconexión en general son bajas. No se forman perturbaciones en la cámara (ver anexo fotografías 225-233).

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF15					
Fase	Punto	Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	99.46	5.26	2.83	0.39
C	20	99.49	5.10	2.92	0.41
C1	60	99.49	10.24	1.46	0.15
ABC	61	198.95	10.10	2.81	0.28
C.I	67	198.95	19.18	0.74	0.05

TABLA 8.31 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF15

TABLA 8.32 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF15

El caudal remanente correspondiente a  $50\text{m}^3/\text{s}$  es evacuado por los tres vertederos de descarga, es distribuido de la siguiente manera:

TABLA 8.33 Caudales de salida prueba PF15

### **PF 16: Caso de Estudio N°4**

En este ensayo se estudia el nivel máximo de la cámara de interconexión necesario para el estudio de un rechazo de carga que investigará la línea, piezométrica máxima en las conducciones. El nivel inicial de la cámara será el correspondiente cuando desde Molino se envía un caudal de  $200\text{ m}^3/\text{s}$  a Sopladora ingresan  $150\text{ m}^3/\text{s}$  y los  $50\text{ m}^3/\text{s}$  restantes son evacuados por los vertederos del río Paute<sup>1</sup>. El nivel máximo alcanzado en la cámara es de  $1317.30\text{msnm}$ . Las velocidades en las obras de interconexión en general son bajas. No se forman perturbaciones en la cámara.

---

<sup>1</sup> Modelación numérica, Obras de Interconexión del Proyecto Hidroeléctrico Sopladora, CGM.

Las siguientes tablas muestran los valores de calado, velocidad, caudal y número de Froude representativos de las diferentes fases de las obras, así como los niveles de agua a la salida de las unidades en prototipo:

PF16					
Fase	Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Calado (m)	Velocidad (m/s)	Nº de Froude
AB	49	99.46	6.26	2.38	0.30
C	20	99.49	6.10	2.45	0.32
C1	60	99.49	11.24	1.33	0.13
ABC	61	198.95	11.10	2.56	0.25
C.I	67	198.95	20.30	0.70	0.05

TABLA 8.34 Variables hidráulicas medidas en las diferentes fases. Prueba PF15

Cota Nivel de Agua (msnm)		PF16
Fase AB	Unidad 1	1319.7
	Unidad 2	1319.76
	Unidad 3	1319.84
	Unidad 4	1319.76
	Unidad 5	1319.92
Fase C	Unidad 6	1319.7
	Unidad 7	1319.96
	Unidad 8	1320.12
	Unidad 9	1320.04
	Unidad 10	1320.04

TABLA 8.35 Cotas de nivel de agua en las unidades. Prueba PF15

## 8.2 CONCLUSIONES SOBRE LOS RESULTADOS DE LA MODELACIÓN FÍSICA

El cambio de diseño no mejoró en su totalidad el comportamiento del flujo como se esperaba, fue necesario realizar varias modificaciones utilizando estructuras complementarias. Para lograr un óptimo funcionamiento de dichas estructuras, se realizaron pruebas expeditivas variando la ubicación de las mismas. Al final, se consiguió conducir el flujo a través de las obras de interconexión de una manera eficiente, libre de perturbaciones.

Se experimentó con bandejas inclinadas tipo orificio para disipar de mejor manera la energía en los cuencos. Estas bandejas además consiguieron elevar el nivel hacia aguas arriba en las fases AB y C, garantizando un régimen subcrítico con bajas velocidades en todas las estructuras.

Los rompeolas colocados en la cámara de interconexión permitieron estabilizar el flujo a la llegada de la tubería de carga. Se consiguió anular las ondas producidas a lo largo de la cámara, el fenómeno de vorticidad desaparecía para cotas superiores a la 1312msnm, cotas inferiores a ésta generaban vórtices de pequeña intensidad sin que logren ingresar a la tubería de carga.

Cuando la central Molino opera a su máxima capacidad ( $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ ), el caudal evacuado por los vertederos de descarga de las obras de interconexión es de  $19.2\text{m}^3/\text{s}$  por la fase AB,  $15.07\text{m}^3/\text{s}$  por la fase C y  $11.27\text{m}^3/\text{s}$  por la descarga intermedia, equivalentes a un 42, 33 y 25% correspondientemente del caudal total evacuado ( $50\text{m}^3/\text{s}$ ). El vertedero de descarga de la fase AB evacúa mayor porcentaje del caudal remanente por ubicarse a una cota inferior que el resto de vertederos (cota vertedero AB=1315.25msnm, cota vertedero C=1315.40msnm y cota vertedero descarga intermedia=1315.60msnm).

Considerando que para caudales superiores a  $150\text{m}^3/\text{s}$  los vertederos de descarga de la fase AB, fase C y descarga intermedia entran en funcionamiento, el flujo se mantenía estable a lo largo de las obras de interconexión.

## **CAPÍTULO 9**

### **CONCLUSIONES**

#### **9.1 CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA DE LA MODELACIÓN FÍSICA**

En ingeniería los modelos físicos son construcciones en escala reducida o simplificada de obras para estudiar en ellos su comportamiento y permitir así perfeccionar los diseños antes de iniciar la construcción de las obras. Es importante establecer ciertas estrategias necesarias para llevar a cabo una buena investigación.

El primer paso fue la definición del problema, transportar el flujo a través de las obras de interconexión de una manera eficiente. Luego se procede a la construcción del modelo de acuerdo a las leyes de similitud que permiten representar fielmente el prototipo a escala reducida, en este caso se usó la ley de similitud de Froude.

Es importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados. Se midieron en laboratorio caudales y calados en diferentes abscisas del modelo, para ser comparados con datos del prototipo y validar así el modelo físico.

Una vez validado el modelo se procedió a la experimentación realizando varias pruebas para los distintos casos de funcionamiento de la centrales Molino y Sopladora y para una amplia gama de caudales.

Luego se interpretan los resultados obtenidos en la modelación física y con base a estos se toma una decisión. El diseño original de las obras de interconexión no satisface los requerimientos necesarios para la conducción del flujo, siendo necesario realizar pruebas expeditivas con estructuras complementarias que permitan establecer el diseño definitivo del modelo.

Una vez establecido el diseño final de la modelación física se procede a realizar las pruebas necesarias para su verificación. La documentación de los resultados obtenidos permite tener una base técnica sobre la cual se respalda el uso del modelo.

## **9.2 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO FÍSICO DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN**

### **Diseño original:**

El diseño original de las obras de interconexión no cumplía con los objetivos planteados para la modelación física. La generación de ondas y perturbaciones a lo largo de todas las obras era notable. La gran turbulencia generada en los cuencos disipadores provocaba que el nivel de la masa de agua oscile y por lo regular, se desperdiciaban caudales inferiores a  $150\text{m}^3/\text{s}$  a través de los tres vertederos de descarga.

El nivel del vertedero en la cámara no era el adecuado por cuanto no se lograba estabilizar las masas de agua en la cámara sin que se desperdicien caudales menores a  $150\text{m}^3/\text{s}$ .

La presencia de vorticidad era notoria incluso para niveles altos (1314msnm) de operación de la cámara. La turbulencia en esta zona provocaba gradientes de velocidad, formando vórtices que introducirán aire a la tubería de carga. La utilización de rejillas como estructuras anti-vórtices, controlan la formación de los fenómenos vorticosos aunque no pueden eliminarlos en un 100%.

### **Estructuras complementarias en el diseño original:**

Colocando clapetas en los tres vertederos de descarga se aumenta la cota de éstas secciones de control, consiguiendo elevar el nivel de agua en los túneles de

las fases AB, C y túnel de interconexión; y haciendo que trabajen a régimen subcrítico.

La transición brusca al inicio de cámara logra mantener las condiciones hidráulicas en el túnel de interconexión y permite el ingreso estable del flujo a la cámara.

Pese a que no se realizaron ensayos con clapetas y transición brusca trabajando simultáneamente, su funcionamiento conjunto ofrecería un buen comportamiento del flujo en las obras de interconexión.

La generación de ondas que iniciaban en los cuencos disipadores de energía expandiéndose hacia aguas abajo hasta la cámara, no pudo ser controlada de forma íntegra con las estructuras complementarias del diseño original. Tratando de mejorar estas condiciones, se experimentó con un rediseño de las obras.

### **Cambio de diseño:**

El comportamiento del flujo con el nuevo diseño no fue el adecuado de acuerdo a los objetivos planteados para las obras de interconexión. Los niveles de la superficie libre del agua en las fases AB y C eran menores a los niveles de operación actual cuando trabajan por separado.

La generación y altura de ondas se incrementó en el túnel de interconexión debido a la turbulencia producida por el resalto hidráulico ubicado en los cuencos disipadores. Este diseño no logra conducir el flujo tranquilo y entregar apropiadamente las aguas hacia la cámara.

Para lograr optimizar el nuevo diseño fue necesario implementar varias estructuras que mejoren las condiciones del flujo. Se usaron dos tipos de estructuras (disipadores de energía tipo bandeja con orificios y rompeolas tipo L).

### **Estructuras complementarias en el diseño definitivo:**

Los disipadores de energía permitieron reducir la turbulencia formada en los cuencos de las fases AB y C que se transmitía hacia aguas abajo hasta la cámara. Además al tener un ángulo de inclinación de  $17^\circ$ , se consiguió elevar el nivel aguas arriba hasta la salida de las 10 unidades de la central Molino, mejorando el comportamiento del flujo.

La poca turbulencia que llegaba a la cámara a través del túnel de interconexión fue eliminada por las estructuras rompeolas. Se consiguió reducir al máximo el fenómeno de vorticidad para caudales menores a 1311msnm. Con los rompeolas se logró tener una variación de nivel de la masa de agua de alrededor 24cm en la cámara.

En los ensayos realizados para controlar las oscilaciones del nivel de la superficie libre en la cámara, se observó que con la colocación de dos estructuras rompeolas, el nivel permanecía estable en la cota 1311msnm. Sin embargo, para asegurar el correcto funcionamiento de la cámara, se determina que la cota del nivel mínimo de operación es la 1312msnm. El nivel máximo es el que garantiza que las turbinas de la central Molino no se ahoguen y que todos los túneles de interconexión trabajen a superficie libre; en la prueba denominada PF16 se determinó que el máximo nivel de operación corresponde a la cota 1317.30msnm.

### **9.3 CONCLUSIONES Y RESTRICCIONES IMPORTANTES EN LOS RESULTADOS DEL MODELO FÍSICO DE LAS OBRAS DE INTERCONEXIÓN**

El diseño definitivo de las obras de interconexión que conectan a la central Molino con la central Sopladora brinda una solución para el transporte del flujo bajo condiciones subcríticas y velocidades bajas.

Se debe tener en cuenta que la modelación física fue realizada bajo ciertas hipótesis y simplificaciones que conducen a algunas restricciones en el prototipo. La ley de similitud adoptada fue la ley de Froude que toma en consideración únicamente la fuerza de gravedad despreciando otros factores importantes como viscosidad, transporte y asentamiento de sedimentos entre otros. El proceso de sedimentación en prototipo puede causar una sobre-elevación del nivel de agua, conllevando a errores en los resultados de la modelación física.

#### **9.4 CONCLUSIONES GENERALES DEL PROYECTO DE TITULACIÓN**

Debido a la crisis energética que atraviesa el país, el gobierno se vio en la obligación de apresurar la implementación de nuevos proyectos hidroeléctricos que mejoren las condiciones actuales. El sector eléctrico constituye un importante pilar en el desarrollo del país, razón por la cual el gobierno espera hasta abril del 2010 empezar cuatro megaproyectos hidroeléctricos: Toachi-Pilatón, Sopladora, Ocaña y Coca Codo Sinclair.

La falta de planificación ha conducido a que un país con tanta riqueza hídrica, como el nuestro, tan solo tenga el 48% de energía eléctrica generada por esa fuente hídrica; la demás proviene de termoeléctricas o se importa, lo cual, es tremendamente nocivo para la nación ya que no sólo es más caro sino más contaminante.

Esta investigación permitirá perfeccionar el diseño de las obras de interconexión que conectarán la Central Molino con Sopladora, antes de empezar la construcción.

En la actualidad se dispone de técnicas avanzadas en modelación física de fenómenos hidráulicos que, unidas al desarrollo de instrumentos de medición, permiten predecir con alto grado de certidumbre lo que pueda ocurrir en el

prototipo y, por tanto, se obtienen óptimos resultados en los aspectos de funcionalidad, estabilidad y economía de las estructuras a construir.

La modelación física constituye una herramienta valiosa para la obtención de una solución práctica a la elaboración del diseño definitivo de las obras de interconexión. Los métodos numéricos plantean soluciones con modelos matemáticos idealizados, realizando simplificaciones importantes, que a su vez causan efectos que deben ser valorados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida.

En el caso de las obras de interconexión, la modelación numérica no reflejaba la realidad de un flujo tridimensional sin mostrar ciertos fenómenos específicos que se formaban en las obras. Fue necesario modificar el diseño original que mediante modelación numérica arrojaba buenos resultados, porque al ser representados físicamente mostraba formación de ondas y perturbaciones perjudiciales.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Naudascher, E., Castro, M. (2000). Hidráulica de Canales. México. Limusa-Noriega.
- Chow, V.T. (1959). Hidráulica de los Canales Abiertos. New York – Bogotá. McGraw Hill.
- Henderson, F.M. (1970). Open Channel Flow. New York. Macmillan.
- Chanson, H. (2002). Hidráulica del Flujo en Canales Abiertos, Colombia. McGraw Hill Interamericana de Colombia.
- Domínguez, F (1950). Hidráulica. Chile.
- Hidalgo, Marcelo: Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas, Ecuador. E.P.N. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Castro, Marco: Análisis Dimensional y Modelación Física en Hidráulica. Ecuador. E.P.N. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. La Modelación Hidráulica en la Ingeniería Civil – Problemas Actuales y Soluciones. E.P.N.
- Castro, Marco. SEPARATAS, Sobre el uso de las diferentes fórmulas para coeficientes de descarga de vertederos de medida. E.P.N. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Viparelli, Carlo. Dissipatori a Griglia di Fondo. Instituto de Hidráulica de la universidad de Napoli.
- Ingenieros del Ejercito de los Estados Unidos. Stilling Basin Design and Wave Suppressor for Canal Structure, Outlet Works, and Diversion Dams (Basin Iv).
- Rocha Felices Arturo. (2003). Los Modelos como herramienta valiosa para el Diseño Hidráulico.
- Páginas Web sobre centrales hidroeléctricas en el Ecuador.

# ANEXOS