

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO EN MODELO HIDRÁULICO DE LAS ESTRUCTURAS DE  
SALIDA DE LOS TÚNELES EN EL APROVECHAMIENTO  
HIDROELÉCTRICO SOPLADORA.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**JOSÉ MIGUEL JUMA PILOZO**

[impjos4@gmail.com](mailto:impjos4@gmail.com)

**DIRECTORA: ING. XIMENA HIDALGO B.M. Sc.**

[ximena.hidalgob@gmail.com](mailto:ximena.hidalgob@gmail.com)

**Quito, Marzo 2012.**

## DECLARACION

Yo José Miguel Juma Piloza, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he 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.

---

**José Miguel Juma Piloza**

## CERTIFICACION

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Miguel Juma Piloza, bajo mi supervisión.

---

Ing. M.Sc. Ximena Hidalgo  
Bustamante DIRECTORA DEL  
PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco infinitamente a Dios quien ha logrado crear una conciencia de ética y moral dirigida al bienestar de otras personas.

A mi familia, Magdalena, José, Roberto, Edgar, Sofía y Mishell quienes me han podido dar una bofetada y un abrazo cuando fue necesario.

A mi tutora Ing. Ximena Hidalgo que sin su ayuda no podría haber terminado mi objetivo.

A mis incomparables amigos Juan Pablo, Andrés, Alejo, Galo y Roberto que los considero como mi segunda familia, con los cuales he pasado muchas aventuras esperando seguir con el mismo propósito de superación.

Un especial agradecimiento al Ing. Franklin Beltran, quien con su paciencia y calidad humana me ha enseñado valores que no se aprenden en la universidad.

Finalmente agradezco a todas esas personas que han sido una motivación para terminar una etapa más de mi crecimiento.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres, Magdalena y José, quienes han entregado mucho en mi vida, esperando siempre tener el suficiente tiempo para poder compensar su esfuerzo.

A todas las personas que se han detenido un momento, para decirme pocas palabras, que han sido grandes para mi, llenado mi mente y espíritu.

## CONTENIDO

<b>DECLARACION .....</b>	<b>II</b>
<b>CERTIFICACION.....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>V</b>
<b>CONTENIDO .....</b>	<b>VI</b>
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>INDICE DE CUADROS.....</b>	<b>XI</b>
<b>INDICE DE FOTOGRAFIAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XVI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XVII</b>
<b>CAPITULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
1.1 GENERALIDADES SOBRE EL PROYECTO “SOPLADORA” .....	1
1.2 DESCRIPCION DEL DISEÑO DEFINITIVO DEL SISTEMA Y SUS PRINCIPALES COMPONENTES.....	2
1.2.1 TUNEL DE DESCARGA INTERMEDIA .....	2
1.2.2 TUNEL DE DESVÍO .....	3
1.2.3 ESTRUCTURA DE UNIÓN.....	3
1.2.4 DISIPADOR DE ENERGÍA.....	3
1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE DE PROYECTO DE TITULACIÓN .....	5
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>CAPITULO 2 .....</b>	<b>6</b>
<b>GENERALIDADES SOBRE LA MODELACIÓN FÍSICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	6

2.2	CLASIFICACIÓN DE MODELOS FÍSICOS.....	6
2.3	SEMEJANZA HIDRÁULICA.....	7
2.3.1	SIMILITUD DINAMICA RESTRINGIDA.....	8
2.3.3	SIMILITUD GEOMETRICA.....	14
2.4	JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO FÍSICO.....	14
2.5	DESCRIPCIÓN DEL MODELO E INSTALACIONES.....	16
2.5.1	GENERALIDADES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA.....	16
2.5.2	DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO.....	16
<b>CAPITULO 3</b>	<b>.....</b>	<b>28</b>
<b>GENERALIDADES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN PROYECTOS HIDRÁULICOS.....</b>		<b>28</b>
3.1	FUNCIONES DE DISIPADORES DE ENERGÍA.....	28
3.2	PROCESOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	30
3.2.1	GENERALIDADES.....	30
3.2.1	MECANISMOS UTILIZADOS.....	30
3.2.3	LIMITACIONES DE USO.....	31
3.3	CRITERIOS PRINCIPALES PARA EL DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA.....	32
<b>CAPITULO 4</b>	<b>.....</b>	<b>35</b>
<b>DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR ESTRUCTURA NORMALIZADA TIPO KUMIN.....</b>		<b>35</b>
4.1	DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA.....	35
4.2	DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN.....	36
4.3	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON EL DISEÑO ORIGINAL.....	38
4.3.1	OBJETIVOS DE LA FASE DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL....	38
4.3.2	PLAN DE PRUEBAS.....	39
4.3.3	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL DISIPADOR DE ENERGÍA.....	41
4.3.4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
4.3.5	MODIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN (MDE - 1).....	53

<b>CAPITULO 5</b> .....	<b>61</b>
<b>DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON EXPANSIÓN</b> .....	<b>61</b>
5.1. INTRODUCCIÓN.....	61
5.1.1 RESALTO HIDRÁULICO CLÁSICO .....	61
5.1.2 RESALTO EN CANALES CON EXPANSIÓN .....	65
5.2 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON EL DISEÑO ORIGINAL .....	67
5.2.1 ESTRUCTURA CON EXPANSIÓN GRADUAL (MDE – 2) .....	67
5.2.3 MODIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN FASE III.....	75
5.2.4 MODIFICACIONES A LA GEOMETRÍA PROPUESTA EN LA FASE III PARA LA ESTRUCTURA DE SALIDA DEL TUNEL DE DESVÍO (MDE-3) .....	96
<b>CAPITULO 6</b> .....	<b>103</b>
<b>ANALISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS</b> .....	<b>103</b>
<b>CAPITULO 7</b> .....	<b>106</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>106</b>
7.1 CONCLUSIONES.....	106
7.1.1 DISIPADOR TIPO KUMIN .....	106
7.1.2 ESTRUCTURA DE CANAL CON EXPANSIÓN .....	107
7.1.3 CONCLUSIONES EN FASES .....	108
7.2 RECOMENDACIONES.....	109
<b>8. REFFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>110</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>ANEXO 1 PLANOS PROTOTIPO Y MODELO</b> .....	<b>113</b>
FASE 1 PLANOS PORTOTIPO Y MODELO.....	114
FASE 2 PLANOS PROTOTIPO Y MODELO.....	122



FASE 3 PLANOS PROTOTIPO Y MODELO.....	125
<b>ANEXO 2 REGISTRO FOTOGRÁFICO.....</b>	<b>134</b>
ANEXOS F1-2A DISIPADOR DE ENERGÍA TIPO KUMIN.....	135
ANEXOS F2-2B DISIPADOR DE ENERGÍA TIPO KUMIN Y ESTRUCTURA CON EXPANSIÓN.....	146
ANEXO F3-2C DISIPADOR DE ENERGÍA ESTRUCTURAS CON EXPANSIÓN.....	156
<b>ANEXOS 3 REGISTRO DE DATOS TOMADOS.....</b>	<b>189</b>
ANEXO F1-3A CALCULOS COMPARATIVOS DE VELOCIDADES DEL DISIPADOR TIPO KUMIN.....	190
ANEXO F2-3B CALCULOS COMPARATIVOS DE VELOCIDADES DE LA ESTRUCTURA CON EXPANSIÓN.....	197
ANEXO F3-3C CUADROS PRUEBAS COMBINADAS PITOT.....	201

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA NO. 1:</b> ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN EN EL PUNTO DE ENTREGA SOBRE EL RÍO PAUTE .....	<b>4</b>
<b>FIGURA NO. 2:</b> NÚMEROS DE FROUDE CRÍTICO AL INTERIOR DE CONDUCCIONES DE SECCIONES TRANSVERSALES RECTANGULAR, TRAPEZOIDAL Y CIRCULAR. ....	<b>11</b>
<b>FIGURA NO. 3:</b> CONDICIONES DE ENTRADA Y SALIDA DE UNA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON RESTITUCIÓN A UN CAUCE DE RÍO .....	<b>29</b>
<b>FIGURA NO. 4:</b> PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA .....	<b>33</b>
<b>FIGURA NO. 5:</b> DISIPADOR TIPO KUMIN-ISOMETRÍA .....	<b>35</b>
<b>FIGURA NO. 6:</b> DIMENSIONES DISIPADOR TIPO KUMIN.....	<b>37</b>
<b>FIGURA NO. 7:</b> CURVA DE TENDENCIA DE LA EFICIENCIA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL CAUDAL PARA EL TÚNEL DE DESVÍO.....	<b>49</b>

<b>FIGURA NO. 8:</b> CURVA DE TENDENCIA DE LA EFICIENCIA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL CAUDAL .....	<b>52</b>
<b>FIGURA NO. 9:</b> ESQUEMA DE LAS MODIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA. MODIFICACIÓN MDE-1 .....	<b>54</b>
<b>FIGURA NO. 10:</b> RESALTO HIDRÁULICO CLÁSICO .....	<b>62</b>
<b>FIGURA NO. 11:</b> RESALTO HIDRÁULICO CLÁSICO .....	<b>63</b>
<b>FIGURA NO. 12:</b> FORMAS DE LOS RESALTOS HIDRÁULICOS CLÁSICOS.....	<b>64</b>
<b>FIGURA NO. 13:</b> FLUJO DE SECCIONES CON EXPANSIÓN. ....	<b>66</b>
<b>FIGURA NO.14:</b> ESQUEMA GENERAL PARA EL CÁLCULO DE ENERGÍA DISIPADA MOSTRANDO LOS PUNTOS DE ANÁLISIS. MODIFICACIÓN MDE-2.....	<b>68</b>
<b>FIGURA NO. 15:</b> PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA SIN CONTROL DESDE AGUAS ABAJO. MODIFICACIÓN MDE-2.....	<b>68</b>
<b>FIGURA NO. 16:</b> PORCENTAJE DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CON CONTROL DESDE AGUAS ABAJO. MODIFICACIÓN MDE-2.....	<b>69</b>
<b>FIGURA NO.17:</b> VISTA EN PLANTA DE LA MODIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA PARA EL TÚNEL DE DESVÍO DE LA FASE III. ....	<b>77</b>
<b>FIGURA NO.18:</b> VISTA EN PLANTA DE LA MODIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA PARA LA DESCARGA INTERMEDIA DE LA FASE III. ....	<b>79</b>
<b>FIGURA NO. 19:</b> UBICACIÓN EN PLANTA DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN LA ZONA DE ENTREGA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO. ....	<b>86</b>
<b>FIGURA NO.20:</b> UBICACIÓN EN PLANTA DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN LA ZONA DE ENTREGA DESDE LA DESCARGA INTERMEDIA. ....	<b>86</b>
<b>FIGURA NO.21:</b> CURVA DE TENDENCIA DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL CAUDAL PARA LA ENTREGA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO.....	<b>89</b>
<b>FIGURA NO.22:</b> CURVA DE TENDENCIA DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL CAUDAL PARA LA ENTREGA DESDE LA DESCARGA INTERMEDIA. ....	<b>89</b>
<b>FIGURA NO. 23:</b> VISTA EN PLANTA DE LA MODIFICACIÓN PARA OPTIMIZACIÓN. ....	<b>96</b>
<b>FIGURA NO. 24:</b> UBICACIÓN EN PLANTA DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD PARA LA ZONA DE DESCARGA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO. MODIFICACIÓN MDE-3. ...	<b>97</b>
<b>FIGURA NO. 25:</b> CURVA DE TENDENCIA DE LA EFICIENCIA EN EL PROCESO DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL CAUDAL PARA LA ENTREGA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO. ....	<b>98</b>
<b>FIGURA NO. 26:</b> CURVAS COMPARATIVAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	<b>104</b>

## INDICE DE CUADROS

<b>CUADRO NO.1:</b> VALORES DE MAGNITUDES FISICAS SEGÚN DIFERENTES CRITERIOS DE SIMILITUD .....	<b>12</b>
<b>CUADRO NO. 2:</b> MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS EN LOS MODELOS FÍSICOS A ESCALA 1:50 Y 1:40 .....	<b>15</b>
<b>CUADRO NO. 3:</b> DATOS DE DIMENSIONES PARA EL DISIPADOR TIPO KUMIN.....	<b>38</b>
<b>CUADRO NO. 4:</b> PLAN DE PRUEBAS PROPUESTO PARA LA FASE DE ENSAYOS CON EL DISEÑO ORIGINAL DE LAS OBRAS DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DESCARGA INTERMEDIA .....	<b>40</b>
<b>CUADRO NO. 5:</b> EVALUACIÓN DE LAS ALTURAS DE ENERGÍA TOTAL EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEL DISIPADOR DE ENERGÍA. ....	<b>43</b>
<b>CUADRO NO. 6:</b> VALORES DEL PARÁMETRO ADIMENSIONAL FROUDE EN LA ZONA DE APROXIMACIÓN HACIA EL DISIPADOR DE ENERGÍA.....	<b>48</b>
<b>CUADRO NO.7:</b> PLAN DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN LA ZONA DE ENTREGA DEL FLUJO AL RÍO PAUTE. FASE III DEL ESTUDIO .....	<b>82</b>
<b>CUADRO NO. 8:</b> VALORES DE LA VELOCIDAD Y PORCENTAJE DE DISIPACIÓN EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MEDIDA, A LA SALIDA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO (VALORES PARA EL MODELO).....	<b>87</b>
<b>CUADRO NO.9:</b> VALORES DE LA VELOCIDAD Y PORCENTAJE DE DISIPACIÓN EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MEDIDA, A LA SALIDA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO (VALORES PARA EL PROTOTIPO). ....	<b>87</b>
<b>CUADRO NO. 10:</b> VALORES DE LA VELOCIDAD Y PORCENTAJE DE DISIPACIÓN EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MEDIDA, A LA SALIDA DESDE LA DESCARGA INTERMEDIA (VALORES PARA EL MODELO).....	<b>88</b>
<b>CUADRO NO. 11:</b> VALORES DE LA VELOCIDAD Y PORCENTAJE DE DISIPACIÓN EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MEDIDA, A LA SALIDA DESDE LA DESCARGA INTERMEDIA (PARA EL PROTOTIPO). ....	<b>88</b>
<b>CUADRO NO. 12:</b> VALORES DE LA VELOCIDAD Y PORCENTAJE DE DISIPACIÓN EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MEDIDA, A LA SALIDA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO (PARA EL MODELO). ....	<b>98</b>
<b>CUADRO NO. 13:</b> VALORES DE LA VELOCIDAD Y PORCENTAJE DE DISIPACIÓN EN LOS DIFERENTES PUNTOS DE MEDIDA, A LA SALIDA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO (PARA EL PROTOTIPO). ....	<b>98</b>
<b>CUADRO NO. 14:</b> VALORES DE PORCENTAJE DE DISIPACIÓN A LA SALIDA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO SOBRE EL ENROCADO (PARA EL PROTOTIPO). ....	<b>101</b>
<b>CUADRO NO. 15:</b> CUADRO COMPARATIVO ENTRE MODIFICACIONES, RESUMIENDO LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN CADA MODIFICACIÓN. ....	<b>105</b>

## INDICE DE FOTOGRAFIAS

<b>FOTOGRAFÍA NO.1:</b> VISTA LATERAL DE LOS TANQUES DE ENTRADA AL TÚNEL DE DESVÍO .....	<b>17</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 2:</b> VISTA SUPERIOR DE LOS TANQUES DE ENTRADA AL TÚNEL DE DESVÍO .....	<b>17</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 3:</b> VISTA LATERAL DEL TANQUE DE ENTRADA A LA DESCARGA INTERMEDIA .....	<b>18</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 4:</b> REPRESENTACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA DEL TRAMO DEL RÍO PAUTE, HACIA AGUAS ARRIBA DE LA ESTRUCTURA DEL TÚNEL DE DESVÍO .....	<b>19</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 5:</b> REPRESENTACIÓN DE LA TOPOGRAFÍA DEL TRAMO DEL RÍO PAUTE, EN LA RESTITUCIÓN AL RÍO. ....	<b>20</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 6:</b> VISTA DE LA TOMA (DERIVACIÓN) DE AGUA, VÁLVULA DE COMPUERTA Y TUBERÍA HACIA EL MODELO DE LA DESCARGA INTERMEDIA.....	<b>21</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 7:</b> VISTA DE LA TOMA (DERIVACIÓN) DE AGUA, VÁLVULA DE COMPUERTA Y ACCESORIOS EN LA TUBERÍA HACIA EL TÚNEL DE DESVÍO .....	<b>21</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 8:</b> INSTALACIÓN DE LA VÁLVULA DE AIRE EN LA TUBERÍA .....	<b>22</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.9:</b> VISTA SUPERIOR DE LA TUBERÍA EN ACRÍLICO PARA REPRESENTAR EL TÚNEL DE DESVÍO .....	<b>23</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.10:</b> TRAMO DE LA TUBERÍA EN ACRÍLICO A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO .....	<b>24</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.11:</b> MODELO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN UBICADO AL EXTREMO DEL TÚNEL DE DESVÍO. ....	<b>24</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 12:</b> MODELO DEL TRAMO FINAL DE LA CÁMARA DE INTERCONEXIÓN.	<b>25</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 13:</b> VISTA LATERAL DEL MODELO DEL VERTEDERO CON PERFIL CREAGER. ....	<b>26</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 14:</b> VISTA SUPERIOR DEL MODELO DEL VERTEDERO CON LAS PAREDES DE DOBLE CURVATURA. ....	<b>26</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 15:</b> MODELO DE LA ESTRUCTURA DE UNIÓN (ANTES DE SU MONTAJE).27	
<b>FOTOGRAFÍA NO. 16:</b> ESTRUCTURA DE UNIÓN DE LA DESCARGA INTERMEDIA Y TÚNEL DE DESVÍO. ....	<b>27</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.17:</b> ESQUEMA CON LA UBICACIÓN GENERAL DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DEFINIDAS PARA LA COMPARACIÓN DE LAS ALTURAS DE ENERGÍA	<b>42</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 18:</b> VISTA SUPERIOR DEL FUNCIONAMIENTO DEL DISIPADOR DE ENERGÍA TIPO KUMIN CON UN CAUDAL DE 1.022 M <sup>3</sup> /S (QTD = 997.0 M <sup>3</sup> /S Y QDI = 25 M <sup>3</sup> /S)	<b>44</b>

<b>FOTOGRAFÍA NO.19:</b> VISTA LATERAL DEL FLUJO DE SALIDA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA TIPO KUMIN CON UN CAUDAL DE 1.022 M <sup>3</sup> /S (QTD = 997.0 M <sup>3</sup> /S Y QDI = 25 M <sup>3</sup> /S)	<b>44</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 20:</b> VISTA FRONTAL DEL FLUJO DE SALIDA DEL DISIPADOR DE ENERGÍA TIPO KUMIN CON UN CAUDAL DE 1.022 M <sup>3</sup> /S (QTD = 997.0 M <sup>3</sup> /S Y QDI = 25 M <sup>3</sup> /S)	<b>45</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 21:</b> ONDA TRANSVERSAL OBLICUA GENERADA PARA CAUDALES SUPERIORES A 500M <sup>3</sup> /S.	<b>45</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 22:</b> VISTA DESDE AGUAS ABAJO DEL TRAMO DEL RÍO PAUTE REPRESENTADO EN EL MODELO, A LA SALIDA DEL TÚNEL DE DESVÍO Y DEL DISIPADOR DE ENERGÍA TIPO KUMIN.	<b>46</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 23:</b> VISTA LATERAL DEL FLUJO DE SALIDA DESDE EL DISIPADOR TIPO KUMIN, HACIA EL CURSO NATURAL DEL RÍO PAUTE, CON UN CAUDAL CERCANO A LOS 900 M <sup>3</sup> /S	<b>47</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 24:</b> FORMACIÓN DEL CUENCO EN EL TRAMO DEL RÍO PAUTE, REPRESENTADO CON MATERIAL SUELTO, LUEGO DE LA OPERACIÓN DEL DISIPADOR CON EL CAUDAL DE 900 M <sup>3</sup> /S.	<b>47</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 25:</b> VISTA SUPERIOR DE LA IMPLANTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN, TIPO KUMIN. MODIFICACIÓN MDE-1.	<b>54</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 26:</b> VISTA FRONTAL DE LA IMPLANTACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN, TIPO KUMIN. MODIFICACIÓN MDE-1.	<b>55</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 27:</b> VISTA FRONTAL DEL FLUJO DE SALIDA CON FUNCIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN CON CAUDAL APROXIMADO = 800 M <sup>3</sup> /S, SE PUEDE OBSERVAR EL CONTROL DE FLUJO POR EL DISIPADOR Y EL INGRESO NO UNIFORME DEL FLUJO.	<b>56</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 28:</b> VISTA FRONTAL DEL FLUJO DE SALIDA CON FUNCIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN CON CAUDAL = 100 M <sup>3</sup> /S. MODIFICACIÓN MDE-1. SIN CONTROL AGUAS ABAJO	<b>57</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 29:</b> VISTA FRONTAL DEL FLUJO DE SALIDA CON FUNCIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN CON CAUDAL = 200 M <sup>3</sup> /S. MODIFICACIÓN MDE-1. SIN CONTROL AGUAS ABAJO	<b>57</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 30:</b> VISTA FRONTAL DEL FLUJO DE SALIDA CON FUNCIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN CON CAUDAL = 900 M <sup>3</sup> /S. MODIFICACIÓN MDE-1. SIN CONTROL AGUAS ABAJO	<b>58</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 31:</b> VISTA FRONTAL DEL FLUJO DE SALIDA CON FUNCIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN CON CAUDAL = 900 M <sup>3</sup> /S. MODIFICACIÓN MDE-1. SIN CONTROL AGUAS ABAJO	<b>58</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 32:</b> VISTA LATERAL DEL FLUJO DE SALIDA CON FUNCIONAMIENTO DEL DISIPADOR. MODIFICACIÓN MDE-1. CON CONTROL AGUAS ABAJO = 6.00M	<b>59</b>

<b>FOTOGRAFÍA NO. 33:</b> FORMACIÓN DEL CUENCO DE SOCAVACIÓN EN EL RÍO PAUTE, REPRESENTADO CON MATERIAL SUELTO, LUEGO DE LA OPERACIÓN DEL DISIPADOR. MODIFICACIÓN MDE-1. CON CONTROL DE AGUAS ABAJO A 6.00M. ....	<b>59</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 34:</b> VISTA FRONTAL DE LA IMPLANTACIÓN DE LA PLATAFORMA DE SALIDA SIN ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN, TIPO KUMIN. MODIFICACIÓN MDE-2.....	<b>67</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 35:</b> VISTA SUPERIOR DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA, SIN LA ESTRUCTURA DE IMPACTO O DISIPADOR A LA SALIDA. MODIFICACIÓN MDE-2. ....	<b>70</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 36:</b> VISTA FRONTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA PLATAFORMA DE ENTREGA, SIN ESTRUCTURA DE IMPACTO O DISIPADOR. MODIFICACIÓN MDE-2.SIN CONTROL DE NIVELES DE SUPERFICIE LIBRE EN EL CAUCE DEL RÍO. PAUTE. ....	<b>70</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 37:</b> VISTA FRONTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA CON QTD=50M <sup>3</sup> /S. MODIFICACIÓN MDE-2. ....	<b>71</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 38:</b> VISTA FRONTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA CON QTD=100M <sup>3</sup> /S. SIN CONTROL DESDE AGUAS ABAJO. MODIFICACIÓN MDE-2.	<b>72</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 39:</b> VISTA FRONTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA CON QTD=200M <sup>3</sup> /S. SIN CONTROL DESDE AGUAS ABAJO. MODIFICACIÓN MDE-2.	<b>72</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 40:</b> RESALTO CIRCULAR EN ESTRUCTURA DE SALIDA CON QTD=200M <sup>3</sup> /S. MODIFICACIÓN MDE-2.....	<b>73</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 41:</b> VISTA FRONTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA CON QTD=500M <sup>3</sup> /S. SIN CONTROL DESDE AGUAS ABAJO. MODIFICACIÓN MDE-2.	<b>73</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 42:</b> VISTA SUPERIOR DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA CON QTD=951M <sup>3</sup> /S. MODIFICACIÓN MDE-2. ....	<b>74</b>
<b>FOTOGRAFÍAS NOS. 43 Y 44:</b> VISTA EN PLANTA Y VISTA FRONTAL DE LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA LA ZONA DE DESCARGA O ENTREGA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO. FASE III .....	<b>78</b>
<b>FOTOGRAFÍAS NO. 45 Y 46:</b> VISTA EN PLANTA Y VISTA FRONTAL DE LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA Y ENTREGA AL RIO PAUTE EN LA DESCARGA INTERMEDIA. FASE III. ....	<b>80</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.47:</b> REPRESENTACIÓN DEL RIO PAUTE CON MATERIAL SUELTO ANTES DEL FUNCIONAMIENTO DEL MODELO.....	<b>84</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 48:</b> FORMACIÓN DEL CUENCO EN EL TRAMO DEL RÍO PAUTE, REPRESENTADO CON MATERIAL SUELTO, LUEGO DE LA OPERACIÓN DEL DISIPADOR. GEOMETRÍA DE FASE III.....	<b>85</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.49:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN EL TÚNEL DE DESVÍO (Q= 100 M <sup>3</sup> /S).....	<b>90</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 50:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN EL TÚNEL DE DESVÍO (Q =200 M <sup>3</sup> /S).....	<b>90</b>

<b>FOTOGRAFÍA NO. 51:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN EL TÚNEL DE DESVÍO (Q =500 M <sup>3</sup> /S).....	<b>91</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 52:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN EL TÚNEL DE DESVÍO (Q =1130 M <sup>3</sup> /S).....	<b>91</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 53:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN LA DESCARGA INTERMEDIA (Q DI=25 M <sup>3</sup> /S).....	<b>92</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 54:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN LA DESCARGA INTERMEDIA (Q=100 M <sup>3</sup> /S).....	<b>92</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 55:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN LA DESCARGA INTERMEDIA (Q DI=150 M <sup>3</sup> /S).....	<b>93</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 56:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN LA DESCARGA INTERMEDIA (Q DI=200 M <sup>3</sup> /S).....	<b>93</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.57:</b> VISTA EN PLANTA DE LA GEOMETRÍA PROPUESTA PARA EL DISEÑO DEFINITIVO DE LA ZONA DE ENTREGA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO.....	<b>97</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 58:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN EL TÚNEL DE DESVÍO (Q =500 M <sup>3</sup> /S). MODIFICACIÓN MDE-3. ....	<b>99</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO.59:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN EL TÚNEL DE DESVÍO (Q =800 M <sup>3</sup> /S). MODIFICACIÓN MDE-3. ....	<b>100</b>
<b>FOTOGRAFÍA NO. 60:</b> VISTA EN PLANTA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA EN EL TÚNEL DE DESVÍO (Q =1000 M <sup>3</sup> /S). MODIFICACIÓN MDE-3. ....	<b>100</b>

## RESUMEN

La disipación de energía en proyectos hidráulicos, es un elemento muy importante para poder garantizar la correcta entrega o restitución al cauce de un río, el proyecto Hidroeléctrico Sopladora, maneja caudales de hasta  $1130\text{m}^3/\text{s}$ , con un salto bruto de  $385.52\text{m}$ , generando una potencia de  $487\text{ MW}$  y aportara anualmente  $2.745\text{ GWh}$  al sistema Nacional interconectado, siendo una aportación importante al país, por lo que es necesario un análisis profundo del comportamiento hidráulico a la salida de los túneles de descarga intermedia y túnel de desvío.

La modelación hidráulica ofrece un estudio aproximado a la realidad del comportamiento de la interacción entre la estructura y el flujo del agua, el modelo fue construido en el laboratorio de CIERHI (Centro de Investigación y Estudios de Recursos Hídricos) de la Escuela Politécnica Nacional, utilizando los diseños propuestos por el CGM (Consortio Gerencia Mazar), teniendo como principales obras civiles: túnel de descarga intermedia, Túnel de desvío, Estructura de unión y Disipador de Energía.

En la fase inicial de la investigación, se estudio el comportamiento del disipador tipo "Kumin", el cual cumplía con el campo de aplicación al caso de la descarga de central Hidroeléctrica Sopladora, se examino para una serie de caudales de entre  $200$  y  $1330\text{m}^3/\text{s}$ , obteniendo registro fotográfico y valores de velocidad.

Se considero analizar estructuras de Canales con Expansión gradual y brusca, con un plan de pruebas de caudales que varían entre  $200$  y  $1330\text{m}^3/\text{s}$ , recopilando información de velocidades, calados y registro fotográfico.



## ABSTRACT

The power dissipation in hydraulic projects, is a very important element to ensure proper delivery or restitution to the riverbed, the hydroelectric project Sopladora will handle flows up to  $1130\text{m}^3 / \text{s}$ , with a gross head of 385.52m, generating a power of 487 MW and 2,745 GWh annually furnish to the National interconnected system, with a significant contribution to the country, so it requires a thorough analysis of the hydraulic behavior at the output of intermediate discharge tunnels and diversion tunnel.

The hydraulic modeling study provides a close to reality the behavior of the interaction between structure and flow of water, the model was constructed in the laboratory of CIERHI (Centre for Research and Studies of Water Resources) of the National Polytechnic School, using the designs proposed by the CGM (Consortium Management Mazar), with the main civil works: intermediate discharge tunnel, diversion tunnel, Structure and binding energy sink.

In the initial phase of the research, study the behavior of the sink type "Kumin" which met the scope of the downloading event Sopladora hydroelectric plant, was examined for a range of flow rates between 200 and  $1330\text{m}^3/\text{s}$ , obtaining photographic record and velocity values.

Was considered to analyze structures with Expansion Channel gradual and abrupt, with a test plan flows ranging from 200 to  $1330\text{m}^3/\text{s}$ , information gathering speed, feathering and photographic records.

# **CAPITULO 1**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 GENERALIDADES SOBRE EL PROYECTO “SOPLADORA”**

La utilización del recurso hídrico como fuente de energía exige el de diseño de obras mucho más eficientes y de bajo costo, para satisfacer la creciente demanda que conduce a un aumento de precios de la energía eléctrica.

El aprovechamiento de la descarga de agua proveniente de la central hidroeléctrica Paute-Molino, corresponde al proyecto Sopladora, ubicado al nororiente de la provincia del Azuay, en los límites de Morona Santiago; sobre la cuenca del río Paute, en el que aprovechará un salto bruto de 385.52 m, entre las elevaciones 1314,07 y 928,55 msnm, aguas abajo de la central Molino. La futura central captará las aguas turbinadas que circulan por los túneles de descarga, antes de la descarga al río Paute.

La central Molino tiene dos sistemas de conducción independientes (Fases AB y C), construidos entre 1975 y 1991, cada uno para un caudal de diseño de 100 m<sup>3</sup>/s. 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 central subterránea de Sopladora sin embargo, 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 362.56 m. La potencia instalada de la central será 487 MW y aportará anualmente 2.745 GWh al Sistema Nacional Interconectado. Las denominadas “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 la operación de estas centrales en cascada. Una ventaja de la conexión directa en cambio es que se asegura que la calidad de las aguas se mantiene, evitando que los sedimentos procedentes tanto de la cuenca intermedia Amaluza - Guarumales como del dragado del embalse de Amaluza puedan llegar hasta la Central Sopladora.

## **1.2 DESCRIPCION DEL DISEÑO DEFINITIVO DEL SISTEMA Y SUS PRINCIPALES COMPONENTES.**

De acuerdo con los y los diseños definitivos entregados por el Consorcio General Mazar (CGM) en junio del 2009, se contrato al CIERHI-EPN para realizar el análisis y optimización del diseño entregado, el esquema general del proyecto, incluye las siguientes obras civiles principales:

### **1.2.1 TUNEL DE DESCARGA INTERMEDIA**

Entregará sus aguas al río Paute, que trabajando conjuntamente con los vertederos de los túneles de descarga de la Central Molino permitirá que éste aprovechamiento continúe funcionando normalmente, a pesar de que la Central Sopladora haya dejado de operar.

Este componente del proyecto está formado por un vertedero frontal con cimacio, en el extremo aguas abajo de la cámara de interconexión, con una longitud de 22.69m hasta el inicio de la sección tipo baúl de B=6m y H=6m, este primer tramo tiene una pendiente de 20% de 95.07m, continuando con una curvatura vertical de 35.48m y el tramo final de 30.15m con una pendiente del 2%, uniéndose finalmente al Túnel de desvío por medio de una estructura descrita posteriormente, la longitud total de la descarga intermedia es de 184.11 m. en el anexo 1 en el plano No. F1-GEN-P2 (Ref.: 367-HID-105, Jul/09) se observa lo descrito.

### **1.2.2 TUNEL DE DESVÍO**

Se prevé la construcción del “Túnel de desvío” del río Paute con el propósito de prevenir y evitar la potencial inundación de la Central Hidroeléctrica Paute ante un eventual fenómeno de deslizamiento de tierras, que pudiera ocurrir en el sector de la casa de máquinas de la central Molino.

Inicia con una estructura de ingreso en la margen izquierda del río Paute con una sección circular de  $D=9.20\text{m}$  de  $51.31\text{m}$ , continua con una transición de  $9.67$  cambiando su diámetro a  $8.80\text{m}$  de  $97.48\text{m}$  de desarrollo y una pendiente de  $18.0\%$ , luego se presenta una curvatura vertical de  $32.40\text{m}$ , el tramo siguiente tiene una longitud de  $1001.64\text{m}$ , pendiente de  $2.0\%$  y de sección circular de  $D=8.80\text{m}$ , para terminar con la estructura de salida, el túnel de desvío tiene una longitud total de  $1189.60\text{m}$ . (ver anexo 1 plano No. F1-GEN-P1- Ref.: 367-HID-100, Jul/09).

### **1.2.3 ESTRUCTURA DE UNIÓN**

Se trata de una estructura de unión de un túnel de sección transversal tipo baúl con un túnel de sección circular, como se indica en el Plano No. F1-GEN-P2 (Ref.: 367-HID-105, Jul/09). La geometría de unión es compleja. Se presenta en el fondo un desnivel de altura constante e igual a  $1\text{m}$ , para evitar la confluencia directa de las masas de agua que fluyen a velocidades altas. El ángulo de unión entre los dos ejes centrales de las conducciones es igual a  $10^\circ$ .

### **1.2.4 DISIPADOR DE ENERGÍA**

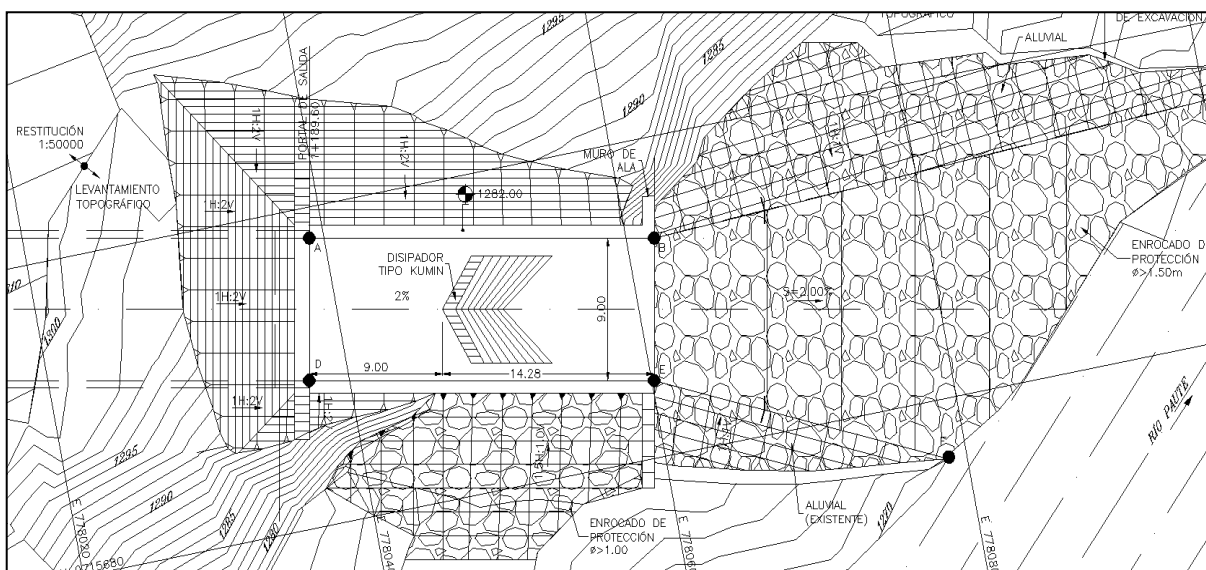
La disipación de energía, a la salida del túnel de desvío y descarga intermedia, debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Debe limitarse el efecto de la erosión o socavación en la zona de restitución del agua al cauce natural y
- El régimen de circulación del flujo hacia aguas abajo debe ser estable.

Según los diseños entregado por CGM se plantea generar una estructura que permita la restitución del portal de salida del túnel con el cauce del río Paute, y buscar disipar la mayor cantidad de la energía adquirida por el flujo en su recorrido. No es posible construir en la orilla del cauce ninguna obra de disipación de hormigón, debido al poco espacio disponible y a las características del flujo del río, que inunda parte de la terraza aluvial donde se ubica la descarga. En el transcurso de los años la terraza puede ser alterada o incluso desaparecer, por efectos de las crecidas del río. Por esta razón se optó por construir un canal abierto, con un ancho constante de 9 m, en una longitud de 23.28 m, con una pendiente longitudinal del 2%. El canal tendrá una sección rectangular, sobre el cual se ubicará la estructura propuesta para la disipación de energía, y que será ensayada en el modelo físico, tipo Kumin, con una configuración geométrica algo compleja que se muestra en el Plano No.F1-DIS-P1 (Ref.: 367-HID-102, Ago/09). La figura No. 1 muestra la implantación de la estructura en el punto de restitución sobre el río Paute, el funcionamiento y características se muestran en el Capítulo 4 del presente estudio.

La plataforma aluvial donde se desarrollarán estas obras tiene una altura promedio de 5 m desde el fondo del río, según los Términos de Referencia entregados por el Consorcio CGM para la construcción de los modelos físicos.

**Figura No. 1:** Estructura de disipación en el punto de entrega sobre el río Paute



**Fuente:** Informe Fase I. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

## 1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE DE PROYECTO DE TITULACIÓN

### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de la investigación es el estudio de la estructura de disipación de energía que permitan una correcta entrega de flujo proveniente de los túneles de descarga intermedia y de desvío, comprobando así, el funcionamiento adecuado y eficiente de las estructuras planificadas, logrando que no existan problemas en el área de restitución al cauce del río Paute.

De las alternativas propuestas se obtendrán criterios técnicos válidos que permitan la selección de las estructuras hidráulicas óptimas para lograr el objetivo principal de la investigación

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Realizar una presentación técnica completa sobre los fenómenos y las estructuras propuestas, definiendo en cada caso las principales características hidrodinámicas de su funcionamiento.
- II. Desarrollar una investigación experimental básica necesaria, que permita observar de manera física las características de funcionamiento de las obras de disipación utilizadas. Estos modelos se realizarán en los laboratorios de CIERHI en la EPN.
- III. Analizar el comportamiento de las estructuras de disipación a diferentes caudales, la serie de *cinco* caudales a ser ensayados será entregado por la descarga intermedia y/o por el túnel de desvío.
- IV. Realizar medidas de velocidades en puntos que identifiquen el comportamiento y reducción de energía.
- V. Observar y relacionar la socavación producida para diferentes caudales previniendo la formación de un colchón de agua, con fines de comparar el movimiento de material granular sobre el cauce del río.
- VI. Establecer una relación entre el tipo de flujo de ingreso a la estructura de disipación con el porcentaje de energía disipada.

## **CAPITULO 2**

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

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

La complejidad del comportamiento de los fenómenos hidráulicos, tales como: turbulencia y dificultad que imponen los contornos reales tridimensionales (cauce de un río), cuando se interviene en la naturaleza con estructuras civiles, provoca que el análisis y la descripción se la realice parcialmente. Uno de los instrumentos más poderosos de que se dispone para conocer y comprender el comportamiento del agua en la Naturaleza y su interacción con las estructuras se encuentra en la investigación mediante los modelos físicos.

La modelación física se utiliza para resolver problemas de ingeniería hidráulica, que consiste en el ensayo de una réplica del problema a escala reducida. La réplica reducida es lo que se llama modelo, frente a la realidad que se llama prototipo.

La base de la modelación física es la teoría de la semejanza. Pero llegar a representar la semejanza dinámica entre modelo y prototipo es imposible, debido a que cada fuerza se presenta de manera muy diferente y en diferente proporción de prototipo a modelo. Sin embargo, si se cumple que, la fuerza dominante en el fenómeno físico que se analiza cumpla con la semejanza dinámica se logrará una buena representación del movimiento real.

#### **2.2 CLASIFICACIÓN DE MODELOS FÍSICOS**

Los modelos reducidos se pueden clasificar en cuatro grandes tipos, todos ellos analizados según la semejanza de Froude<sup>1</sup>:

---

<sup>1</sup> Boletín informativo, UPC 2003, Modelos reducidos en ingeniería fluvial.

- Los modelos de estructuras hidráulicas, es decir, de obras de corta extensión, emplazadas en los ríos y estudiadas en sus características hidráulicas. El fondo es fijo (no erosionable). La preparación del modelo debe atender sobre todo a la correcta reproducción geométrica.
- Los modelos de lecho fijo o modelos “hidráulicos” de ríos, en sentido estricto. Son de contornos o lecho fijo (no erosionable) y reproducen un tramo extenso de río. El objetivo del modelo es el estudio de las magnitudes hidráulicas: calados, velocidades, superficie inundada, etc. El modelo debe representar correctamente la geometría y la rugosidad fluvial.
- Los modelos de lecho móvil o modelos “fluviales”. Son de lecho móvil (erosionable) y también reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo, es por un lado, la obtención de las magnitudes hidráulicas y por otro el comportamiento del fondo erosionable: erosiones, sedimentaciones, etc. El modelo debe representar correctamente la geometría y la rugosidad y debe emplear criterios de semejanza respecto al sedimento utilizado y respecto al caudal sólido.
- Los modelos de obras locales en lecho móvil, de corta extensión y realizados para el estudio de fenómeno locales de la superficie libre y sobre todo del lecho, tal como la erosión local. Deben reproducir correctamente la geometría y emplear criterios de semejanza respecto al sedimento.

Para el estudio presente se toma como tipo el modelo de estructuras hidráulicas, teniendo como principal objetivo, la correcta reproducción geométrica.

### **2.3 SEMEJANZA HIDRÁULICA**

En el caso de estructuras hidráulicas de control, 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.

La ausencia de similitud para las fuerzas de importancia secundaria produce los **efectos de escala**, que en la investigación deben ser reducidos al mínimo y que deben ser evaluados durante el análisis y el procesamiento de la información. Para todo resultado experimental se debe hacer mención a estos efectos de escala, de tal modo que puedan ser utilizados en forma de criterios de diseño hidráulico.

El análisis que se presenta a continuación, expone los criterios de similitud dinámica válidos para la estructuras de disipación de energía y se señalan los potenciales efectos de escala que habrán de ser considerados en el procesamiento de los datos obtenidos en el laboratorio.

### 2.3.1 SIMILITUD DINAMICA RESTRINGIDA

El fenómeno de flujo en consideración corresponde al movimiento del agua a través de una estructura hidráulica donde, en primer lugar, se trata de flujo rápido con superficie libre bajo el efecto de la gravedad, que simultáneamente produce alta disipación de energía por su velocidad superior a 15m/s, lo que puede ocasionar alto porcentaje de introducción de aire y puede generar problemas de inestabilidad y de cavitación.

Considerando que la simulación del flujo en los conductos trata de un flujo con superficie libre, donde los cambios en las fuerzas de inercia se deben exclusivamente al efecto de la gravedad, el principal criterio de similitud a seleccionarse es el *criterio de Froude*. Esto significa que el Froude en el modelo,

en lo posible, debe ser igual al del prototipo. Adicionalmente, en este tipo de movimiento del agua, los cambios en la magnitud y en la dirección del vector velocidad están controlados y gobernados por la geometría del contorno. El modelo entonces debe ser *no distorsionado*: las características geométricas deben estar representadas a detalle y su influencia debe ser idéntica tanto en el modelo como en el prototipo, lo que permitirá transponer directamente los coeficientes adimensionales de descarga y de presión, medidos en el laboratorio, para su uso en el diseño a escala natural.

Dado que la longitud de los tramos considerados para el análisis, del Túnel de desvío y descarga intermedia, es relativamente larga (longitud total del tramo/profundidad del flujo  $> 100$ ), el efecto de la fricción interna (viscosidad) sobre las características hidrodinámicas del movimiento del agua es relativamente apreciable, si se lo compara con la incidencia de la fuerza gravitacional. En consecuencia, para el presente caso el efecto de las fuerzas viscosas también debe ser incluido.

La simulación *apropiada* del efecto viscoso, que se atribuye a la fricción interna y al rozamiento con el contorno en el interior del conducto, 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. Es decir:  $\lambda_m = \lambda_p$ , donde  $\lambda_m$  es el factor de fricción en la relación de Darcy – Weisbach para el modelo y  $\lambda_p$  es el factor de fricción en la relación de Darcy – Weisbach para el prototipo. De este modo, a pesar de que se tenga  $Re_M < Re_P$ , se logra la representación apropiada del patrón de flujo de la pérdida porcentual de energía.

El cumplimiento estricto de la anterior condición conduce a que el modelo sea construido en material con comportamiento hidráulicamente liso para toda la gama de caudales a ser ensayada así como que se garantice que el flujo para el modelo, en todos los casos, sea turbulento totalmente desarrollado.

Para el caso del modelo en análisis se tiene que el coeficiente calculado  $\lambda_m$  presenta un valor superior en un 25% respecto del valor calculado<sup>2</sup>  $\lambda_n$ , se espera que la pérdida de energía en el modelo relativamente sea mayor que la pérdida correspondiente del prototipo. Este hecho conduce a la necesidad de que, al momento de evaluar la eficiencia en la disipación de energía en el prototipo sobre la base de las magnitudes medidas en el modelo, se deba incluir el efecto de que el modelo resulta ser más eficiente que el prototipo.

Adicionalmente, debe tomarse en cuenta que la disipación de energía originada en la estructura puede estar apropiadamente representada, únicamente si el flujo en el modelo es turbulento totalmente desarrollado. Para cumplir con este requerimiento los números de Re en modelo y en prototipo deben ser siempre superiores a  $10^5$ .

La presencia de flujo inestable en el prototipo puede ser analizada con la ayuda del modelo físico, si es que el número de Vedernikov ( $Ve$ ) es igual en el prototipo y en el modelo. Este número de Vedernikov ( $Ve$ ) representa las condiciones críticas bajo las cuales las fuerzas de inercia dan lugar a las ondas superficiales transversales y longitudinales, y su valor depende fundamentalmente de la forma del canal, de la rugosidad del contorno, de la alineación en planta y de la pendiente longitudinal. Por su significado y por su expresión cuantitativa, el número de Vedernikov igual a la unidad puede ser transformado en un Froude, que en la literatura técnica se reconoce como el *Froude crítico*  $F_{rc}$ . Este valor define las condiciones bajo las cuales un flujo llega a ser inestable.

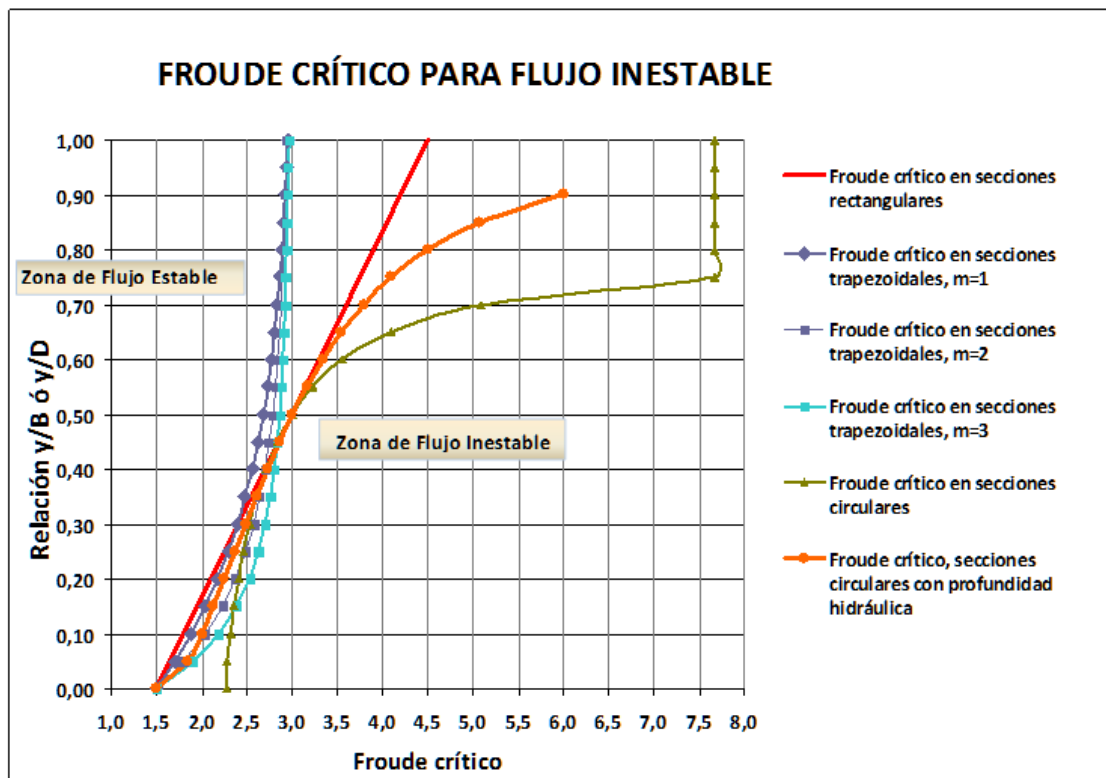
Bajo esta consideración, y para el análisis de los casos presentes de conductos con sección transversal circular y tipo baúl, es suficiente la similitud bajo el criterio de Froude para lograr la similitud del flujo potencialmente inestable. Si los valores del Fr calculados en el modelo, y que son idénticos a los del prototipo, llegan a ser iguales a los  $F_{rc}$ , entonces el flujo es inestable tanto en modelo como en prototipo.

---

<sup>2</sup> J. Carrera, V. Lara, 2010 “Estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío y en el túnel de descarga intermedia de la central Hidroeléctrica Sopladora”.

En la siguiente Figura No. 2, se presenta la variación del número  $F_{rc}$  en función de las relaciones  $y/B$  o  $y/D$  (profundidad de agua / ancho del canal rectangular o profundidad de agua / diámetro).

**Figura No. 2<sup>3</sup>:** Números de Froude crítico al interior de conducciones de secciones transversales rectangular, trapezoidal y circular.



**Fuente:** Informe Fase I. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

Para la representación del fenómeno de introducción de aire se debería considerar que las fuerzas predominantes son las de tensión superficial, o lo que es lo mismo, que el criterio de similitud requerido, a más del criterio de Froude, es el de Weber. De acuerdo a estos dos criterios, de Froude y de Weber, y tomando en cuenta que tanto en el prototipo como en el modelo se trabaja con agua de tensión superficial constante, las principales relaciones de magnitudes físicas o escalas resultantes se presentan en la siguiente. Cuadro No. 1, en donde:  $L_r$  es la escala de longitudes o la relación entre longitudes similares del prototipo respecto de la del modelo;  $g_r=1$ , representa que la gravedad es idéntica en modelo y en

<sup>3</sup> Informe Primera fase. Estudio en el Modelo Hidráulico Del Túnel de Desvío de la Central Paute Molino.

prototipo;  $\sigma_r=1$ , que el valor de la tensión superficial es idéntica en modelo y en prototipo;  $\gamma_r = 1$ , que el peso específico es igual en modelo y en prototipo porque se utiliza el mismo líquido (agua) en los ensayos en el laboratorio.

**Cuadro No.1:** Valores de magnitudes físicas según diferentes criterios de similitud<sup>4</sup>

MAGNITUD FISICA	Similitud según Froude	Similitud según Weber
Longitudes	$L_r = L_p/L_m$	$L_r = L_p/L_m$
Superficies	$A_r = L_r^2$	$A_r = L_r^2$
Velocidades	$V_r = L_r^{1/2}$ con $g_r=1$	$V_r = L_r^{-1/2}$ con $\gamma_r = g_r = 1$
Tiempo	$t_r = L_r/V_r = L_r^{1/2}$	$t_r = L_r/V_r = L_r^{3/2}$
Caudales	$Q_r = V_r \cdot A_r = L_r^{5/2}$	$Q_r = V_r \cdot A_r = L_r^{3/2}$
Aceleración	$a_r = V_r/t_r = 1$	$a_r = V_r/t_r = L_r^{-2}$
Presión	$(p/\gamma)_r = L_r$	$(p/\gamma)_r = L_r$

**Fuente:** Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas. Hidalgo M. EPN

Se observa que, de acuerdo con el criterio de similitud de Weber, en el modelo deben presentarse velocidades superiores a aquellas correspondientes del prototipo. Por ejemplo, en el caso bajo análisis, si  $L_r = 50$ , la velocidad en el modelo debería ser siete veces mayor que en el prototipo (bajo la hipótesis de  $\gamma_r = 1$ ); sin embargo, únicamente bajo el criterio de similitud de Froude, el valor de la velocidad en el modelo es siete veces el valor correspondiente de la velocidad en el prototipo.

Tomando en consideración la vigencia del criterio de similitud de Froude, la escala del parámetro adimensional de Weber se reduce a:  $We_r = V_r^2 L_r = L_r$ . Por lo tanto, un modelo operado bajo el criterio de similitud de Froude subestima la cantidad de aire que ingresa o es introducido en la masa de agua, puesto que el número de Weber efectivo en el modelo es menor que aquél del prototipo.

<sup>4</sup> Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas, Hidalgo M. EPN

Sin embargo, a pesar de esta restricción en la técnica de modelación física es posible obtener una representación óptima de la introducción de aire siempre que el modelo froudiano tenga una escala de longitudes inferior a  $Lr=20$  y se pruebe la eficiencia de la estructura, con caudales superiores al caudal máximo de diseño hasta en un 25%. Este procedimiento permitirá la observación del fenómeno de introducción de aire en el modelo en proporción similar a la que ocurrirá en la naturaleza. Esta recomendación se fundamenta en los estudios realizados en una familia de modelos, construidos con diferentes escalas de longitudes y operados justamente para evaluar el efecto de escala debido a la tensión superficial y a la formación de burbujas de aire que pueden ser introducidas en la masa de agua. El número de Reynolds debe garantizar en cualquier caso el flujo turbulento totalmente desarrollado.

Con el fin de mantener dicho efecto en valores representativos del prototipo se puede operar el modelo, sea modificando la tensión superficial del agua con aditivos (detergentes) o sea incrementando artificialmente la velocidad equivalente. Es decir, para el estudio de las características hidráulicas se mantiene la escala de velocidades según Froude, mientras que, para el estudio de la problemática relacionada con la introducción de aire, se aumenta adecuada y artificialmente la velocidad en el modelo.

La evaluación por separado de la influencia relativa de la viscosidad y de la tensión superficial en el modelo físico es normalmente imposible, dado que son efectos que pueden compensarse entre sí. Mientras la tensión superficial en el modelo afecta al grado de curvatura de la superficie libre del agua y por lo tanto, a su aceleración local centrífuga; la viscosidad relativamente mayor en el modelo hace que esta incidencia sea menor.

En el tratamiento de datos experimentales que se obtengan en las mediciones de la estructura de disipación, deberán mantener siempre todos estos requerimientos mencionados, para garantizar la similitud dinámica así como para obtener un adecuado procesamiento de la información, que será posteriormente transcrita como bases de diseño.

### **2.3.3 SIMILITUD GEOMETRICA**

Escogido un criterio de similitud se debe proceder a la determinación de las escalas del modelo. En la selección de las escalas intervienen numerosos factores. De un lado están las exigencias teóricas originadas en el Parámetro Característico de la Información, y, de otro, las circunstancias de tipo práctico vinculadas al Laboratorio y a los objetivos de la investigación. El desarrollo de este tema escapa a los alcances de esta exposición, pero bastaría con recordar que una cierta escala satisfactoria, desde el punto de vista teórico, podría no ser compatible con las instalaciones de un determinado laboratorio.

Por lo tanto, para la selección de escalas se requiere no sólo el conocimiento profundo de las circunstancias teóricas aplicables, sino también las vinculadas al laboratorio en el que se va a realizar la investigación, tales como espacio disponible, capacidad de bombas instaladas, precisión de los instrumentos existentes y muchos otros factores más. Como consecuencia de lo anteriormente expuesto resulta que un modelo podría estudiarse en un laboratorio con una determinada escala y en otro laboratorio con una escala diferente.

Un tema vinculado indirectamente a la selección de escalas es el correspondiente a la determinación de los límites del modelo. El establecimiento de las condiciones de frontera es sumamente importante y requiere de gran experiencia.

## **2.4 JUSTIFICACIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO FÍSICO**

De la información técnica proporcionada por el CGM se conoce que el caudal de diseño en el túnel de desvío es igual a 1.130 m<sup>3</sup>/s y en la descarga intermedia, el caudal de chequeo llega a ser igual a 200 m<sup>3</sup>/s. Para estos valores se estiman las magnitudes hidrodinámicas del modelo.

Las principales dimensiones geométricas han sido tomadas de los planos antes citados, que fueron entregados por el Consultor CGM. En el Cuadro No. 2 se observan las principales dimensiones geométricas del modelo así como las

variables hidrodinámicas relevantes para los modelos de escalas longitudinales 1:50 y 1:40, respectivamente, sobre la vigencia del criterio de similitud según Froude.

**Cuadro No. 2:** Magnitudes características en los modelos físicos a escala 1:50 y 1:40

Magnitudes Físicas	Dimensiones en el Prototipo	Dimensiones en el Modelo, escala 1:50	Dimensiones en el Modelo, escala 1:40
Longitud del túnel	1.280 m	25,6 m	32 m
Sección del túnel			
Circular	9 m	18 cm	22,5 cm
Tipo Baúl	6 x 7 m	12 x 14 cm	15 x 17,5 cm
Caudales de operación			
Túnel de desvío	50 - 1130 m <sup>3</sup> /s	2,8 - 63,9 l/s	4,9 - 111,7 l/s
Descarga Intermedia	15 - 200 m <sup>3</sup> /s	0,8 - 11,3 l/s	1,5 - 19,8 l/s
Desnivel entre secciones extremas	38 m	0,76 m	0,95 m

**Fuente:** Informe Fase I. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

Como se mencionó en la Propuesta Técnica de la EPN, de común acuerdo con el CGM, se selecciona la escala de longitudes 1:50 ( $L_r = 50$ ) para el estudio en modelo físico. Se ha procurado escoger el modelo de mayor tamaño, que pueda ser construido en el nuevo laboratorio del CIERHI - EPN, tomando en cuenta las disponibilidades físicas de espacio, de caudales y simultáneamente, de la carga hidráulica desde el inicio del modelo.

La selección de la escala  $L_r = 50$  es adecuada y apropiada para la representación de los fenómenos hidrodinámicos objeto de la presente investigación, demostrado en la calibración y validación del modelo físico<sup>5</sup>. Teniendo presente que la efectividad de la disipación de energía en el modelo será en mayores proporciones que en el prototipo incluyendo estas observaciones en los análisis de cada tipo de estructura de disipación. Se reconoce que el área total requerida para el estudio experimental es disponible en el área cubierta del Laboratorio del CIERHI. El área total es de  $30 \times 1 \text{ m}^2$ ; incluyendo las dos estructuras de alimentación a los túneles, el área de simulación de las obras de conexión entre las centrales y las estructuras de restitución de caudales en el laboratorio. En el

<sup>5</sup> J. Carrera, V. Lara, 2010 "Estudio en modelo hidráulico del túnel de desvío y en el túnel de descarga intermedia de la central Hidroeléctrica Sopladora".



anexo 1 plano No F1-GEN-M1 se presenta la implantación general inicial del modelo, en el laboratorio del CIERHI.

La disipación de energía variara directamente como la cuarta potencia de la escala lineal del modelo, o de la forma de la ecuación<sup>6</sup>:

$$E_r = L_r^4$$

Por lo que la estructura, tipo Kumin, en modelo resultará de mayor eficiencia con respecto al funcionamiento del prototipo.

## **2.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO E INSTALACIONES**

### **2.5.1 GENERALIDADES SOBRE LA INFRAESTRUCTURA**

El modelo inicial, está ubicado en el Laboratorio del CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional como se indica en el Plano No. F1-GEN-M1, del ANEXO No. 1. El Laboratorio cuenta con un sistema de bombeo de capacidad 800 l/s, un canal de recirculación de flujo y existen varias tomas de agua a lo largo del perímetro de la planta del laboratorio. En el modelo bajo análisis se usan dos tomas de agua: (i) una para el tanque de entrada al Túnel de Desvío y (ii) la segunda, para el tanque de entrada a la Descarga Intermedia.

### **2.5.2 DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO**

#### **2.5.2.1 Tanques de Entrada**

Existen dos tanques de almacenamiento de agua, con las siguientes características:

- a) Tanque de entrada al Túnel de Desvío:

Se configura con dos estanques desfasados, separados por una pared de 30 cm de ancho, como se indica en el Plano No.F1-GEN-M2, del ANEXO No. 1. Tienen

---

<sup>6</sup> Edward A. Elevatorski. 1959. Hidraulic Energy Dissipators

las siguientes dimensiones: Tanque 1, 1.15 x 2.00 x 3.00 m<sup>3</sup> y Tanque 2, 1.20 x 2.00 x 2.50 m<sup>3</sup>. Están contruidos de hormigón armado, reforzado externamente con perfiles de acero e impermeabilizados, en su interior, con láminas de material Chova. Las dimensiones geométricas se encuentran detalladas en el Plano No. F1-GEN-M3, del ANEXO No. 1 En las siguientes Fotografías Nos. 1 - 2 se muestran los detalles de los tanques.

**Fotografía No.1:** Vista lateral de los tanques de entrada al Túnel de Desvío



**Fotografía No. 2:** Vista superior de los tanques de entrada al Túnel de Desvío



b) Tanque de entrada a la Descarga Intermedia:

Se conforma por dos estanques desfasados, separados por una pared de 30 cm de ancho, como se indica en el Plano No.F1-GEN-M2, del ANEXO No. 1. Las estructuras tienen las siguientes dimensiones: (i) Tanque 1, 2.10 x 1.00 x 2.50 m<sup>3</sup> y (ii) Tanque 2, 1.20 x 1.00 x 2.50 m<sup>3</sup>. Han sido construidos de hormigón armado, reforzados externamente con perfiles de acero e impermeabilizados en su interior por medio de láminas de material Chova. Las dimensiones geométricas se encuentran detalladas en el Plano No. F1-GEN-M3, del ANEXO No. 1. La fotografía No. 3 indica ciertos detalles del tanque en mención.

**Fotografía No. 3:** Vista lateral del Tanque de Entrada a la Descarga Intermedia



### 2.5.2.2 Tanques para representación del río Paute

a) Tanque No. 1 para simulación de la topografía del tramo superior:

Se ubica a continuación del tanque de almacenamiento a la entrada al Túnel de Desvío. Está construido de hormigón armado, con dimensiones interiores de 2.60 x 3.70 x 0.60 m<sup>3</sup>. La configuración topográfica se construye con terrocemento sobre un relleno de bloques, en base a los datos de algunos perfiles transversales

levantados en el campo y de otros obtenidos de la restitución aerofotogramétrica del tramo del río, como se muestra en la siguiente Fotografía No. 4. (Ver plano F1-GEN-M4 anexo 1).

**Fotografía No. 4:** Representación de la topografía del tramo del río Paute, hacia aguas arriba de la estructura del Túnel de Desvío



b) Tanque No. 2 para simulación de la topografía del tramo inferior:

Este tanque se encuentra ubicado aguas abajo de la descarga desde el Túnel de Desvío. Está construido de hormigón armado, con las siguientes dimensiones interiores: 2.70 x 3.70 x 0.60 m<sup>3</sup>. Los detalles de este tanque se indican también en la Fotografía No. 5. La configuración topográfica se construye con terrocemento sobre un relleno de bloques, en base a los datos de pocos perfiles transversales levantados en el campo y de otros obtenidos de la restitución aerofotogramétrica del tramo del río. (Ver plano F1-GEN-M3 anexo 1)

**Fotografía No. 5:** Representación de la topografía del tramo del río Paute, en la restitución al río.



### **2.5.2.3 Elementos para toma o derivación del agua desde el sistema de recirculación.**

Se tiene dos tomas para abastecimiento de agua a los tanques de almacenamiento. Cada toma se desarrolla con un codo de 90°, seguido de una válvula de compuerta conectada a la tubería de admisión, de diámetro 200 mm. La longitud de la tubería es de 9.27 m para el Tanque de Carga 1 y de 21.21m para el Tanque de Carga 2. La tubería se sujeta mediante abrazaderas y pernos sobre los apoyos de hormigón. Adicionalmente, se tienen 4 codos de 90° para cada tanque; en la parte superior de la tubería se instala una válvula de aire.

En la descarga de la tubería al interior de los tanques se tienen perforaciones para disipar la energía residual en el ingreso del flujo. Estas características son comunes tanto para el Tanque de Carga del Túnel de Desvío como para el Tanque de Carga a la Descarga Intermedia, como se muestra en el Plano No. 5-TAD del ANEXO 1, y en las Fotografías Nos. 6 - 8.

**Fotografía No. 6:** Vista de la toma (derivación) de agua, válvula de compuerta y tubería hacia el modelo de la Descarga Intermedia



**Fotografía No. 7:** Vista de la toma (derivación) de agua, válvula de compuerta y accesorios en la tubería hacia el Túnel de Desvío



**Fotografía No. 8:** Instalación de la válvula de aire en la tubería



#### **2.5.2.4 Modelos del Túnel de desvío y de la descarga intermedia**

Es necesario la descripción de las obras de conducción ya que esto influye directamente en la estructura de disipación, esta descripción corresponde al modelo en la fase inicial (Fase 1), en los capítulos consecutivos se describe los cambios y modificaciones que se presentaron en el análisis del modelo.

a) Estructura de entrada, Túnel de desvío, estructura de salida.

- Estructura de entrada

Construida de madera, presenta finos acabados, los detalles de la estructura deben ser de suma precisión, ya que este punto condiciona de mayor manera el flujo aguas abajo.

- Túnel de Desvío:

Tubo moldeado en acrílico e instalado aguas abajo de la estructura de entrada, conformado por un tramo de tubería de diámetro 18.4 cm, pendiente del 18% y

una longitud de 1,014 m. a continuación se tiene una transición excéntrica desde el diámetro 18.4 cm a 18.0 cm, con pendiente de 18% y una longitud de 19.2 cm; a partir de esta sección, el diámetro permanece constante y es igual a 18 cm, el tramo de la tubería es recto con pendiente de 18% y una longitud de 1,895 m. Luego se tiene un tramo de curva vertical, con una longitud igual a 0.84 m; posteriormente se dispone nuevamente de un tramo recto de 5.64 m, con pendiente del 2%, que se mantiene constante. A continuación aparece un tramo de curva horizontal, cuya longitud es igual a 4.24 m; después se tiene un tramo recto de 4.85 m, seguido de un tramo de curva horizontal de longitud igual a 3.84 m. El túnel de desvío termina con un tramo recto de 1.41 m. La tubería en acrílico se instala sobre mesas metálicas, la pendiente de los tableros puede ser regulada mediante pernos de ajuste puestos en los apoyos, como se muestra a continuación.

**Fotografía No.9:** Vista superior de la tubería en acrílico para representar el Túnel de Desvío





**Fotografía No.10:** Tramo de la tubería en acrílico a la salida del Túnel de Desvío



- Estructura de salida

Esta estructura se conforma con un canal de madera, con pintura tipo esmalte, sobre el cual se ubica el dissipador tipo Kumin. Este dissipador está construido en acrílico, y se implanta aguas Abajo de la descarga del túnel de desvío como se muestra en la Fotografía No.11 a continuación.

**Fotografía No.11:** Modelo del dissipador Tipo Kumin ubicado al extremo del Túnel de Desvío.



## b) Descarga Intermedia

- Tramo Final de la Cámara de Interconexión: es un tanque de paredes de acrílico, ubicado aguas arriba del vertedero de cimacio tipo Creager, con dimensiones 0.28 x 0.60 x 0.90 m<sup>3</sup>. La Fotografía No.12 muestra los detalles del modelo de este tanque aguas arriba del vertedero:

**Fotografía No. 12:** Modelo del tramo final de la Cámara de Interconexión.



- Vertedero de Perfil Creager: Es un vertedero de cimacio, moldeado en acrílico, con paredes de igual material y de ancho variable. La variación del ancho corresponde a dos curvas en planta. Se ubica aguas abajo de la cámara de interconexión y está colocado sobre una mesa metálica. Las Fotografías Nos. 13 y 14 muestran la instalación.

**Fotografía No. 13:** Vista lateral del modelo del vertedero con perfil Creager.



**Fotografía No. 14:** Vista superior del modelo del vertedero con las paredes de doble curvatura.



- Estructura de Unión de las dos conducciones:

La unión es de tipo “Y”; está conformada por un canal de sección rectangular de 12 x 12 cm<sup>2</sup> de la Descarga Intermedia y la sección circular de diámetro 18 cm, que corresponde al Túnel de Desvío. Los detalles del modelo de la unión se indican tanto en las Fotografías Nos. 15 y 16.

**Fotografía No. 15:** Modelo de la estructura de unión (antes de su montaje).



**Fotografía No. 16:** Estructura de unión de la Descarga Intermedia y Túnel de Desvío.



## **CAPITULO 3**

### **GENERALIDADES DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN PROYECTOS HIDRÁULICOS**

#### **3.1 FUNCIONES DE DISIPADORES DE ENERGÍA**

La energía a lo largo de estructuras hidráulicas son generalmente grandes si las descargas son a través de conductos de salida o caídas, por lo que el gasto de energía de los flujos a altas velocidades es requerida para prevenir el impacto en los cauces en ríos, minimizar la erosión, y prevenir problemas en las estructuras hidráulicas.

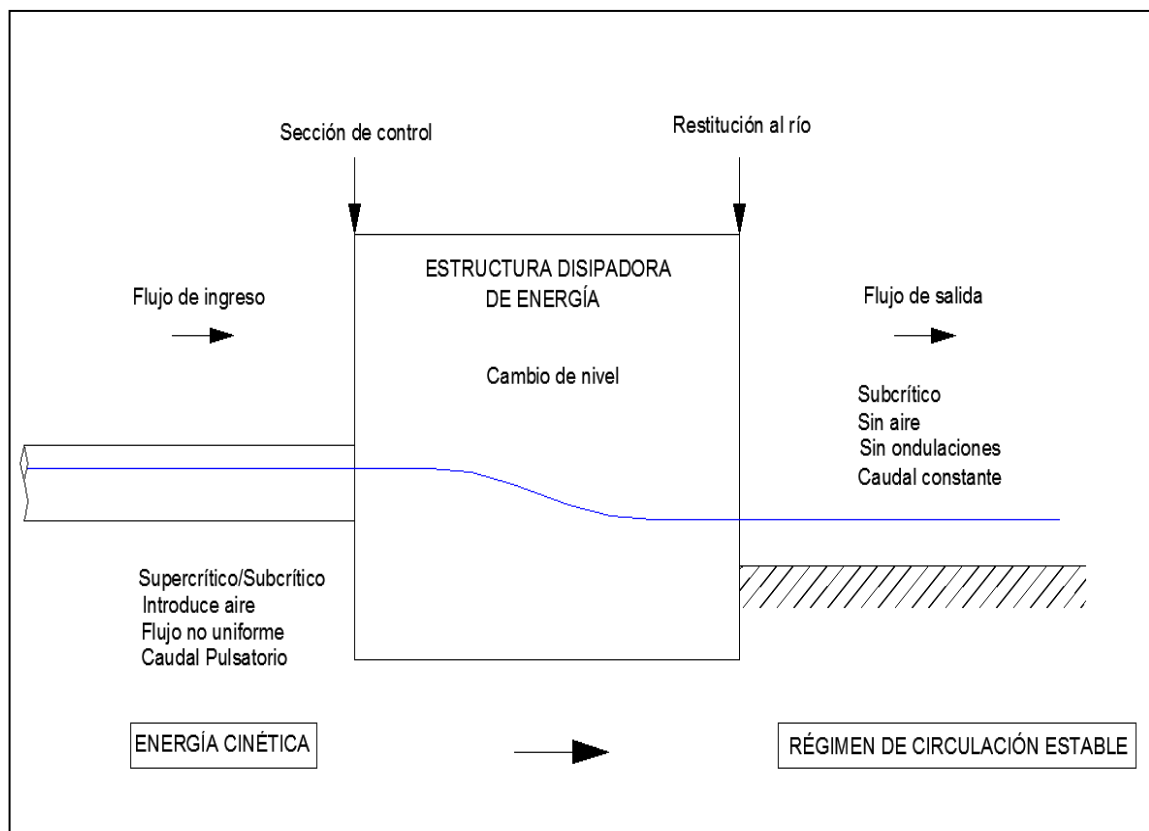
El mecanismo de control más común, para estructuras a superficie libre, es la presencia del flujo crítico (Numero de Froude = 1) en una ubicación bien definida, ya que en este punto es en donde se presenta la energía mínima. Sin embargo en estructuras de disipación de energía, por lo general el flujo de aproximación presenta variaciones entre supercrítico a subcrítico, ya que son el resultado de una amplia gama de caudales y velocidades para una geometría definida. Otro proceso que frecuentemente está presente y debe ser considerado en el análisis del flujo de aproximación es el ingreso de aire, así también como la presencia de un flujo no permanente caracterizado por un caudal pulsatorio. Estos fenómenos están básicamente relacionados con las altas velocidades de flujo, que normalmente superan los valores correspondientes al Froude crítico.

En la salida de una estructura de disipación de energía, el agua que llega con apreciable velocidad, tiende al choque normal sobre el fondo. Si no se prevé la formación de un colchón de agua, existe el efecto grave de impacto del chorro de alta velocidad directamente sobre el contorno sólido. En este caso, la afectación de la estructura no se limita únicamente al efecto de abrasión sobre el fondo o paredes que reciban la incidencia del chorro, sino también a la vibración inducida. Por tal motivo, un condicionamiento importante que debe cumplirse a la salida de una estructura de disipación de energía, es la presencia de una masa de agua que amortigüe el impacto del chorro, permitiendo que la energía cinética del

chorro final de caída se distribuya y se disipe adecuadamente por medio de la turbulencia local, de la vorticidad y de la introducción de aire, del intercambio de impulso a una superficie mayor.

En la figura No. 3, se esquematiza la definición de las condiciones de flujo de aguas arriba y aguas abajo de una estructura de disipación de energía que permite una correcta entrega al cauce de un río.

**Figura No. 3:** Condiciones de entrada y salida de una estructura de disipación de energía con restitución a un cauce de río



**Elaborado: José Juma**

Desde el punto de vista de diseño se señalan los siguientes puntos como requerimientos indispensables que deben ser tomados en cuenta para la concepción de obras especiales que permitan una correcta disipación de energía.

- i. Conducción apropiada: se debe tener en cuenta que el flujo en conductos a superficie libre contienen cargas variables y arrastre de material sólido,

además de una amplia gama de caudales de operación. El flujo de aproximación debe permitir que la estructura cumpla con sus objetivos fundamentales.

- ii. Facilidad constructiva.
- iii. Facilidad para las operaciones de mantenimiento y reparación.
- iv. Económicamente rentable y justificable, incluyendo los costos de operación y de mantenimiento.

## **3.2 PROCESOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA**

### **3.2.1 GENERALIDADES**

La operación de cualquier disipador de energía debe alcanzar la eliminación del excedente de la energía cinética en un flujo, evitando así el riesgo de socavación de las estructuras y de las obras que se ubican aguas abajo.

En términos generales, la energía es disipada mediante procesos de difusión de la velocidad entre partículas de agua que entran con alta energía cinética dentro de una masa de agua con velocidades bajas o masa estática. Este efecto de difusión es similar al que se produce al aumento de temperatura. En base a este concepto, la energía mecánica se convierte en calor, sin embargo, este cambio de temperatura es muy pequeño y podría considerarse insignificante.

### **3.2.1 MECANISMOS UTILIZADOS**

Para lograr estos efectos que producen disipación de energía, principalmente en hidráulica, se utilizan algunas combinaciones de los siguientes métodos:

- Ingreso de una partícula de agua dentro de una masa de agua y,
- Chorros de agua en el aire.

En el primer caso, está relacionada con el consumo de energía debido a intensos procesos de fricción interna que se manifiestan a través de la formación de vórtices, que se generan principalmente en las zonas de corte o de alto gradiente de velocidad. Para inducir una eficiente disipación de energía, por lo tanto, resulta muy importante lograr zonas de alta turbulencia.

En el segundo caso, la disipación de energía resulta de la resistencia del aire, ejercida durante la caída. Esta disipación es significativa si la altura de caída es pequeña y la diferencia de velocidades entre el chorro y el aire es considerable.

Frecuentemente, una combinación de estos métodos es utilizado para todo tipo de estructura de disipación. Fundamentalmente en estructuras que disipan la energía cinética mediante la fricción interna.

En todos los casos se logra una mayor eficiencia de la disipación de energía, mientras mayor sea la perturbación provocada en la masa del fluido (agua o aire), dentro de la que se introduce el chorro de agua con alta energía cinética.

### **3.2.3 LIMITACIONES DE USO**

Como condición de prevención, es necesario tener en cuenta que la disipación de energía se logra correctamente por una fuerte turbulencia o por una efectiva difusión de le flujo. Sin embargo, los diseños de un disipador de energía y elementos hidrodinámicos están expuestos constantemente a estos efectos que pueden tener grandes consecuencias para la estabilidad de las propias obras, tales como<sup>7</sup>:

- Pulsaciones,
- Vibraciones
- Erosión
- Abrasión, o
- Cavitación.

---

<sup>7</sup>, A.A.Balkema/Rotterdam/Brookfield/1995 "Energy Dissipators"



Los disipadores de energía deben, por lo tanto ser diseñados para resistir todos los efectos muchas veces inevitables desde el punto de vista dinámico. Desafortunadamente, no existe material capaz de soportar firme y permanentemente los efectos de cavitación, ni tampoco de abrasión. Esto representa una limitación importante para el dimensionamiento que debe ser considerada.

Es necesario, conocer y aplicar adecuadamente los límites físicos impuestos por los materiales comúnmente utilizados. La mayoría de disipadores de energía se debe construir en acero o concreto, de tal modo que las propiedades de estos materiales de construcción comunes fijen los límites de aplicación del diseño hidráulico.

### **3.3 CRITERIOS PRINCIPALES PARA EL DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA**

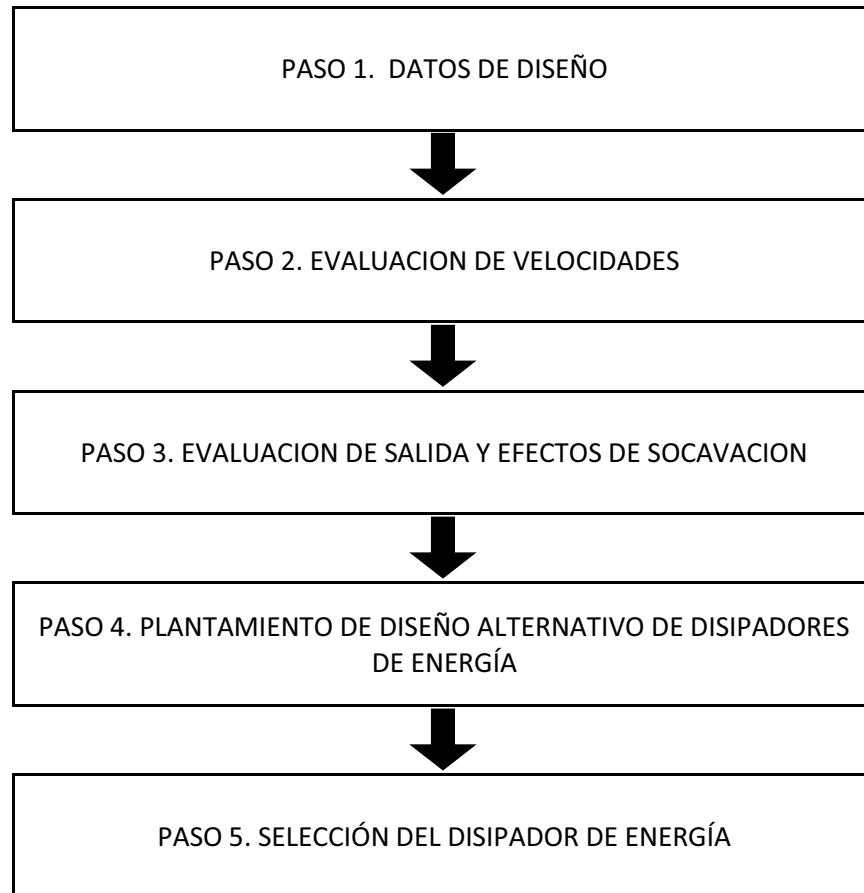
El diseño de disipadores de energía así como de elementos hidráulicos como alcantarillados, canales de protección debe ser tratado como un sistema integrado, debido a que en su diseño intervienen varios factores como el rendimiento del canal por la presencia del disipador, pérdidas no consideradas en el diseño, aumentos o reducción de velocidad, condiciones aguas abajo del canal (profundidad, velocidad y estabilidad del canal).

El procedimiento de diseño de un disipador de energía<sup>8</sup> se muestra en la figura No.4.

---

<sup>8</sup> Hydraulic Engineering Circular No. 14, Third Edition. "Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels"

**Figura No. 4:** procedimiento de diseño de disipadores de energía



**Fuente:** Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels

**Paso 1.** Datos de diseño. Los disipadores de energía debe ser considerada como parte de un diseño de un sistema más grande como por ejemplo una presa, en la cual existen estructuras que tienen una función específica como: el ingreso del flujo, la conducción y una descarga. En este punto es necesario conocer los datos representativos de la obra como:

- Datos de conducción (dimensiones, pendiente, rugosidad, transiciones).
- Datos de entrega o restitución al río (material erosionable, limitaciones físicas, vegetación, tipo de suelo, etc.)
- Evaluación de estabilidad para cada estructura

**Paso 2.** Evaluación de velocidades. Realizar un análisis de velocidades en puntos representativos, de tal manera que se pueda evaluar los problemas que se

pueden presentar en el punto de restitución al río. Si la velocidad de la conducción es menor a la velocidad en el flujo natural del río no es necesaria una obra auxiliar, si es moderadamente alta se puede solucionar con una fosa de socavación (paso 3), si la velocidad es extremadamente alta es necesario evaluar disipadores de energía.

**Paso 3.** Evaluación de la salida del foso de socavación. Se calcula las dimensiones de recorrido en la salida de la conducción para tener una apreciación de la zona de afectación por la salida del flujo. Si el tamaño del foso de socavación es aceptable, se debe documentar la longitud esperada del foso de socavación, para el mantenimiento y el monitoreo respectivo. Si el tamaño del foso de socavación es excesivo, se debe evaluar disipadores de energía (paso 4).

**Paso 4.** Diseño Disipadores de energía. Se compara los datos de diseño identificadas en el paso 1, estableciendo condiciones para el correcto uso de los diferentes tipos de disipadores de energía. Se diseña uno o más de los disipadores de energía que satisfagan sustancialmente los criterios de diseño. Los disipadores se dividen en dos grupos de carácter general basadas en el  $Fr^9$ :

1.  $Fr < 3$ , la mayoría de los diseños se encuentran en este grupo
2.  $Fr > 3$ , las condiciones aguas abajo del canal, las condiciones del lugar, y el costo también debe ser considerados en la selección de diseños alternativos.

**Paso 5.** Selección del disipador de energía. Se compara las alternativas de diseño y se selecciona el disipador que tiene la mejor combinación de costo y la reducción de la velocidad. Cada situación es única y el ejercicio del juicio de ingeniería será siempre necesario. Es necesario documentar las alternativas consideradas.

---

<sup>9</sup> Hydraulic Engineering Circular No. 14, Third Edition. "Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels"

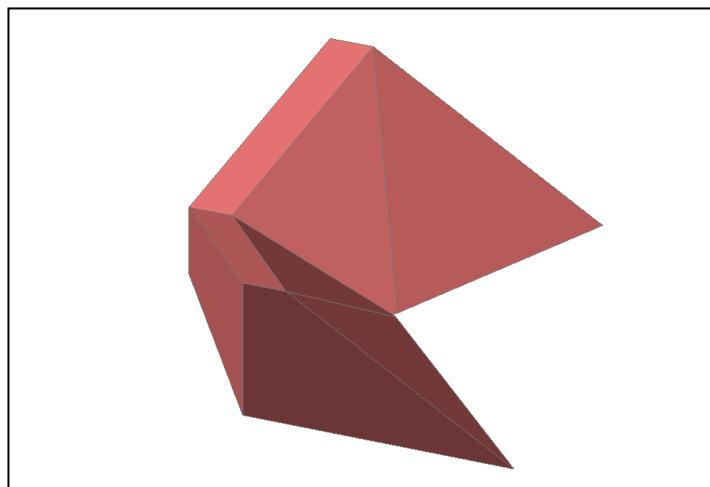
## CAPITULO 4

### DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR ESTRUCTURA NORMALIZADA TIPO KUMIN

#### 4.1 DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA

Modificar las características del resalto es una técnica utilizada en el dimensionamiento de cuencos de disipación, reduciendo su longitud de desarrollo, obligando a disminuir también a la estructura que lo controla. Este objetivo se consigue con la utilización de elementos disipadores cuya eficiencia puede evaluarse por la acción que tienen en la disminución de la longitud, estabilización y fijación del resalto. De la validez de esta técnica, surgen las estructuras normalizadas para la disipación de energía por resalto, conjuntamente surgen centros especializados que estudian este tipo de estructuras, el diseño original planteado por el CGM seleccionó el disipador de energía tipo KUMIN, que ha sido desarrollado por el “Instituto Hidrotécnico VEDENEEV” (VNIIG), en Leningrado, Unión Soviética. Es una estructura compacta, de tipo supercavitante, provista de bloques disipadores de geometría un tanto compleja. Las alturas de los bloques no son constantes, aumentando desde la parte central a los extremos. Es considerada la estructura más eficiente para la disipación de energía<sup>10</sup>.

**Figura No. 5:** Disipador Tipo KUMIN-Isometría



<sup>10</sup> Luis Castillo, 1987, “Disipadores de energía”

Este tipo de estructura muestra como característica principal que las dimensiones de funcionamiento se fijan en función del número de Froude del flujo entrante y de los calados conjugados. Sin embargo, es necesario para los tipos de estructuras de disipación normalizadas, realizar ensayos, en modelos hidráulicos para asegurar el correcto funcionamiento del cuenco que genera la disipación de energía.

## 4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL DISIPADOR TIPO KUMIN

Las dimensiones de los bloques disipadores, de este tipo de estructura de disipación normalizada, están relacionadas con el calado crítico ( $Y_c$ ) y con el ancho del canal en el punto de entrega ( $B$ ), la altura de los bloques no es constante variando desde  $0.35 Y_c$  en la parte central hasta  $0.7 Y_c$  en las partes externas. Una distancia de bloque de inicio de  $1.30 Y_c$  desde el punto de entrega. El dimensionamiento se muestra en la figura No.6.

- Altura de Bloques:            centro:  $0.35Y_c$  ; extremos:  $0.7 Y_c$
- Ancho de Bloques:             $(0.6-0.8) Y_c$
- Ancho de coronación:         $0.11 Y_c$
- Ubicación:                       $1.30 Y_c$

El campo de aplicación está regido por las siguientes características:

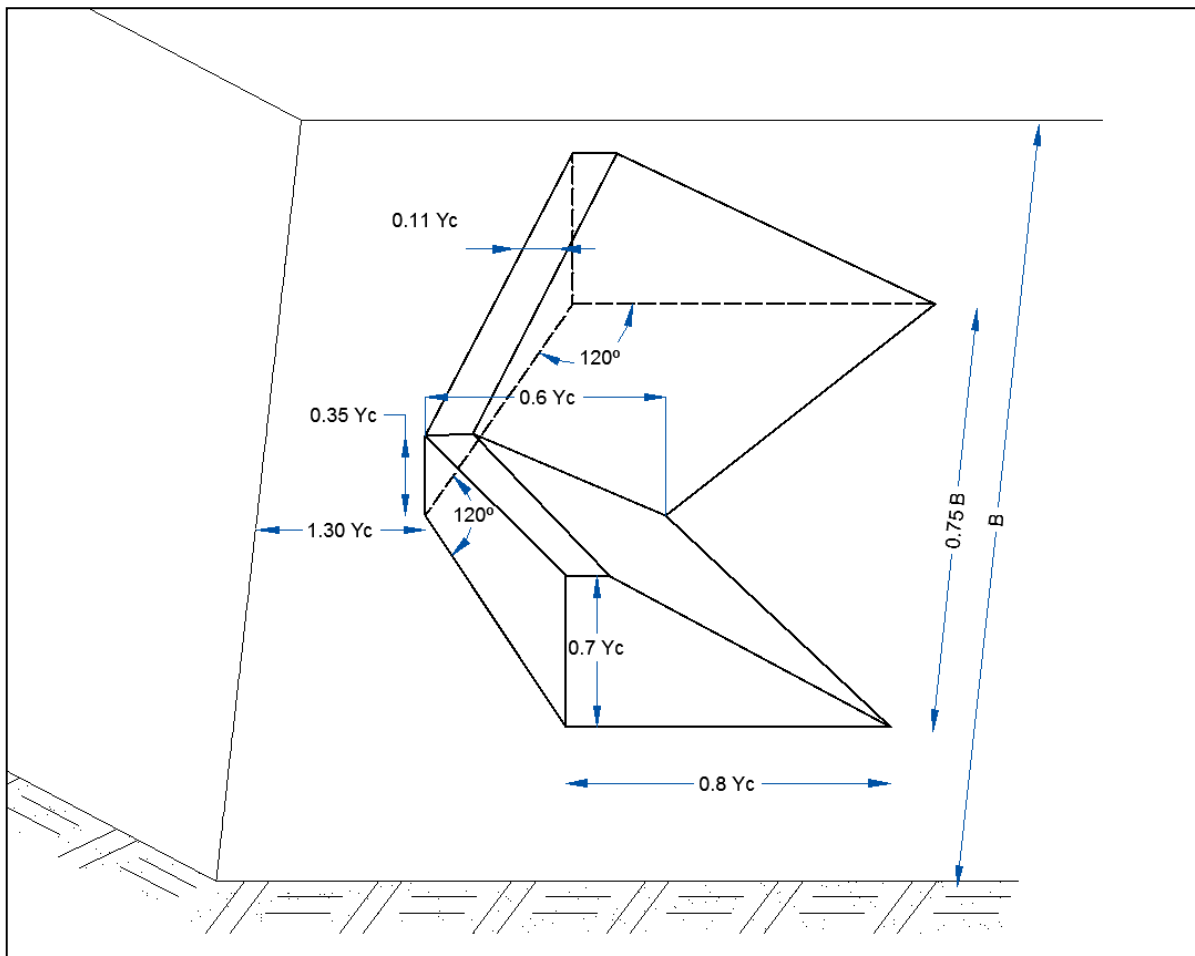
- Numero de Froude:             $2.5 \leq F1 \leq 10$
- Caudal Unitario:                 $q < 100 \text{ m}^2/\text{s}$
- Altura de caída:                 $H \leq 30 \text{ m}$

Debido a la eficiencia del disipador con Froude altos, tiene una ventaja de poder ser utilizada para velocidades de ingreso altas ( $9\text{m/s} < V1 < 25 \text{ m/s}$ )<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> Luis Castillo, 1987, "Disipadores de energía"

**Figura No. 6:** Dimensiones Disipador Tipo KUMIN.



**Fuente:** Disipadores de energía. Luis Castillo

Según criterios de diseño entregados por el Consorcio General Mazar, el campo de aplicación del disipador esta dentro de las características de flujo a la salida del túnel de desvío en el punto de restitución al rio Paute, por ser una estructura compacta se ubica correctamente al poco espacio que se tiene en el punto de descarga al rio, además se considera una de las estructuras de mayor eficiencia en el campo de disipación de energía por lo que se espera un comportamiento adecuado y dentro de los valores permitidos para la disipación.

El dimensionamiento entregado por el CGM se muestra en el cuadro N° 3 y en el anexo 1 en el plano No. F1-DIS-P1.

**Cuadro No. 3:** Datos de dimensiones para el dissipador tipo Kumin

DATOS PARA DIMENSIONAMIENTO			
Caudal de Diseño	Qd	500	(m <sup>3</sup> /s)
Ancho de Canal	B	9	(m)
Caudal Unitario	q	55,56	(m <sup>3</sup> /s/m)
Velocidad de Salida	V	18,82	(m/s)
Calado de Salida	y	2,58	(m)
DIMENSIONES DEL DISIPADOR TIPO KUMIN			
Numero de Froude	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g * y}}$	3,74	
Calado crítico	$Yc = \sqrt[3]{q^3/g}$	6,80	(m)
Altura inicial del bloque	$h1 = 0,35 Yc$	2,38	(m)
Ancho inicial del bloque	$b1 = 0,60 Yc$	4,08	(m)
Altura final del bloque	$h2 = 0,70 Yc$	4,76	(m)
Ancho superior del bloque	$b2 = 0,11 Yc$	0,75	(m)
Ancho inferior del bloque	$b3 = 0,80 Yc$	5,44	(m)
Ancho del bloque	$b4 = 0,75 b$	6,75	(m)
Distancia de inicio	$L = 1,30 Yc$	8,84	(m)

Elaborado: José Juma

### 4.3 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON EL DISEÑO ORIGINAL

#### 4.3.1 OBJETIVOS DE LA FASE DE PRUEBAS CON EL DISEÑO ORIGINAL

La descarga del proyecto está definida por la combinación de dos flujos; la del túnel de desvío y la descarga intermedia, por lo que se realizaron una serie de cinco caudales, entre 100 y 1330 m<sup>3</sup>/s, que representan los casos de interés en el análisis de flujo sobre el dissipador. Esta serie incluye por lo menos la combinación del caudal que transitará por el túnel de desvío más el caudal máximo con el que trabajará la descarga intermedia. Para la geometría correspondiente del diseño

original, el programa mínimo de pruebas debe analizar el funcionamiento del dissipador propuesto en toda la gama de caudales de operación de la estructura.

Mediante esta serie de pruebas o ensayos en el modelo se podrá definir la bondad del funcionamiento y eficiencia del diseño geométrico propuesto, en relación con los patrones de flujo en la zona de restitución al río Paute, investigando los problemas de funcionamiento que podrían presentarse en la estructura de descarga, con lo que se obtendrá experimentalmente la eficiencia de la estructura.

#### **4.3.2 PLAN DE PRUEBAS**

El Plan de Pruebas, se muestra en el cuadro No.4, con el objeto de conseguir los objetivos técnicos señalados para la Fase de Ensayos con el Diseño Original.

Las pruebas de flujo combinado del túnel de desvío y descarga intermedia corresponden al real funcionamiento previsto en el diseño.



**Cuadro No. 4:** Plan de Pruebas propuesto para la Fase de ensayos con el Diseño Original de las Obras del Túnel de Desvío y Descarga Intermedia

Prueba No.	TUNEL DE DESVIO		DESCARGA INTERMEDIA		CAUDAL TOTAL		OBSERVACIONES
	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Modelo (l/s)	Caudal Prototipo (m <sup>3</sup> /s)	Caudal Modelo (l/s)	
1	100	5,7			100	5,7	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo y datos de calado y velocidad aguas arriba y aguas abajo del dissipador
2	200	11,3			200	11,3	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo sobre el dissipador
3	500	28,3			500	28,3	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo y datos de calado y velocidad aguas arriba y aguas abajo del dissipador
4	1130	63,9			1130	63,9	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo y datos de calado y velocidad aguas arriba y aguas abajo del dissipador
5			25	1,4	25	1,4	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo, por ser caudales bajos no es necesario analizar la eficiencia del dissipador
6			100	5,7	100	5,7	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo, por ser caudales bajos no es necesario analizar la eficiencia del dissipador
7			200	11,3	200	11,3	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo, por ser caudales bajos no es necesario analizar la eficiencia del dissipador
8	200	11,3	25	1,4	225	12,7	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo además de datos de calado y velocidad aguas arriba y aguas abajo del dissipador. Esta prueba corresponde a una condición de diseño de la estructura.
9	200	11,3	200	11,3	400	22,6	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo además de datos de calado y velocidad aguas arriba y aguas abajo del dissipador. Esta prueba corresponde a una condición de diseño de la estructura.
10	1130	63,9	200	11,3	1330	75,2	Se obtiene registro fotográfico del comportamiento del flujo además de datos de calado y velocidad aguas arriba y aguas abajo del dissipador. Esta prueba corresponde a una condición de diseño de la estructura.

**Fuente:** Informe Fase I. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

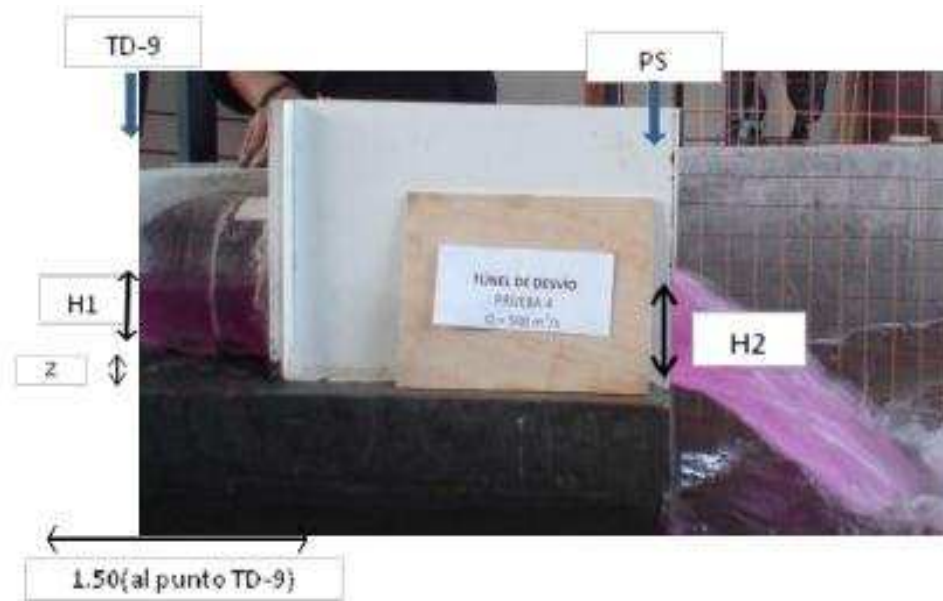
### 4.3.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL DISIPADOR DE ENERGÍA

El análisis mostrado se refiere a la Fase I del proyecto de modelación del proyecto “CENTRAL HIDROELECTRICA SOPLADORA”. De conformidad con el plan de pruebas planteado para el estudio experimental del diseño original de la estructura de disipación de energía al finalizar el Túnel de Desvío y la descarga en el cauce natural del río Paute, se desarrollaron diez pruebas con caudales que varían entre 25 m<sup>3</sup>/s y 940,5 m<sup>3</sup>/s. Las pruebas en el modelo se realizaron sin la simulación de la topografía del tramo hacia aguas abajo en el río Paute, por lo que el flujo desde el disipador cae directamente en el tanque final de recolección del agua del modelo, permitiendo así la visualización del vertido libre del flujo principal. Para la medición de la geometría, alcance y amplitud horizontal del chorro de salida del disipador en el modelo, se utiliza una malla cuadriculada con distancias transversales y verticales iguales a 2 m en el prototipo (4 cm en modelo).

Para realizar el estudio del flujo a lo largo del modelo se establecieron puntos de medición, en lo relacionado a la disipación de energía se utilizó el punto cercano a la entrega del río (TD-9) ubicado a 75 m (1.50m en el modelo) de la sección transversal al final del túnel.

En la fotografía No.17 se presenta el esquema donde se indican las secciones transversales en el extremo final del Túnel de Desvío, entre las cuales se realiza el análisis sobre las alturas de energía del flujo, para evaluar el grado alcanzado en la disipación de energía.

**Fotografía No.17:** Esquema con la ubicación general de las secciones transversales definidas para la comparación de las alturas de energía



La información experimental obtenida dentro del proceso de análisis del funcionamiento del dissipador de energía en el rango mencionado de caudales de operación, se presenta en el siguiente Cuadro No. 5, donde:

H1: es la altura del calado en la conducción (punto TD-9)

H2: es la altura del calado a la salida de la estructura de disipación tipo Kumin (PS)

z: es la diferencia de alturas entre el punto TD-9 y el punto PS

En el Anexo 2 (F1-2A) se presenta asimismo la serie de fotografías donde se aprecia la operación del dissipador de energía, registrada para el rango de caudales ensayados. En el anexo 3 (F1-3A) se muestra los valores obtenidos de calados del funcionamiento de la estructura tipo Kumin. En las fotografías siguientes se muestran las principales características del flujo en el dissipador de energía.

**Cuadro No. 5:** Evaluación de las alturas de energía total en las secciones transversales del dissipador de energía.

CAUDAL m <sup>3</sup> /s (1)	Calados Medidos m (2)		AREA m <sup>2</sup> (3)	Velocidades m/s (4)=1/3	Carga de Velocidades m (5)	Z m (6)	E (7)=2+5+6	ΔE m (8)=7-6	% Perdida (9)=8/7*100	OBSERVACIONES
	h1	h2								
104,30	h1	2,02	10,68	9,77	4,82	1,5	8,34	4,26	51,14	Flujo del tunel de desvío Q <sub>TD</sub> =104,3m <sup>3</sup> /s
	h2	3,53	31,77	3,28	0,54	0	4,07			
224,51	h1	3,12	19,59	11,46	6,63	1,50	11,25	4,73	42,00	Flujo combinado Q <sub>TD</sub> =199,8m <sup>3</sup> /s, Q <sub>CD</sub> =24,7m <sup>3</sup> /s
	h2	5,48	49,32	4,55	1,05	0,00	6,53			
397,75	h1	3,68	24,47	16,25	13,34	1,50	18,52	9,70	52,39	Flujo combinado Q <sub>TD</sub> =198,0m <sup>3</sup> /s, Q <sub>CD</sub> =199,8m <sup>3</sup> /s
	h2	6,44	57,92	6,87	2,38	0,00	8,82			
498,51	h1	4,29	29,92	16,66	14,01	1,50	19,80	9,47	47,79	Flujo del tunel de desvío Q <sub>TD</sub> =498,51m <sup>3</sup> /s
	h2	7,78	70,02	7,12	2,56	0,00	10,34			
940,45	h1	6,74	51,10	18,40	17,10	1,50	25,34	8,32	32,82	Flujo del tunel de desvío Q <sub>TD</sub> =940,45m <sup>3</sup> /s
	h2	14,34	129,06	7,29	2,68	0,00	17,02			
998,79	h1	7,38	55,83	17,89	16,16	1,50	25,04	4,50	17,99	Flujo combinado Q <sub>TD</sub> =898,0m <sup>3</sup> /s, Q <sub>CD</sub> =100,8m <sup>3</sup> /s
	h2	18,77	168,89	5,91	1,77	0,00	20,53			

**Fuente:** Informe Fase I. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

**Fotografía No. 18:** Vista superior del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de 1.022 m<sup>3</sup>/s ( $Q_{TD} = 997.0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No.19:** Vista lateral del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de 1.022 m<sup>3</sup>/s ( $Q_{TD} = 997.0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 20:** Vista frontal del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de 1.022 m<sup>3</sup>/s (QTD = 997.0 m<sup>3</sup>/s y QDI = 25 m<sup>3</sup>/s)



El flujo de aproximación hacia la estructura de disipación no presenta una distribución uniforme de la profundidad en el sentido transversal. Se observa la presencia clara de ondas cruzadas, desde la zona en el ingreso mismo del dissipador. Se presenta una onda transversal oblicua, originada desde la zona de aproximación del flujo principal del Túnel de Desvío hacia el dissipador.

**Fotografía No. 21:** Onda transversal oblicua generada para caudales superiores a 500m<sup>3</sup>/s.



La distancia de esta onda varía con el caudal; de manera que, para los caudales más bajos la influencia se muestra en una longitud relativamente mayor; es decir, la formación de esta onda transversal se inicia desde una mayor distancia, aguas arriba del dissipador. Para los caudales más altos, la onda transversal es claramente oblicua y se forma prácticamente ya en la zona de ingreso hacia la estructura del dissipador.

La presencia del dissipador tipo Kumin, en la plataforma de esta estructura luego de la sección final del Túnel de Desvío, provoca una elevación del flujo principal, la misma que para los caudales altos alcanza prácticamente la altura de los muros laterales. La escotadura central del bloque dissipador tipo Kumin genera una menor elevación en la zona central; mientras que, en la zona cercana a las paredes, el flujo alcanza mayor altura.

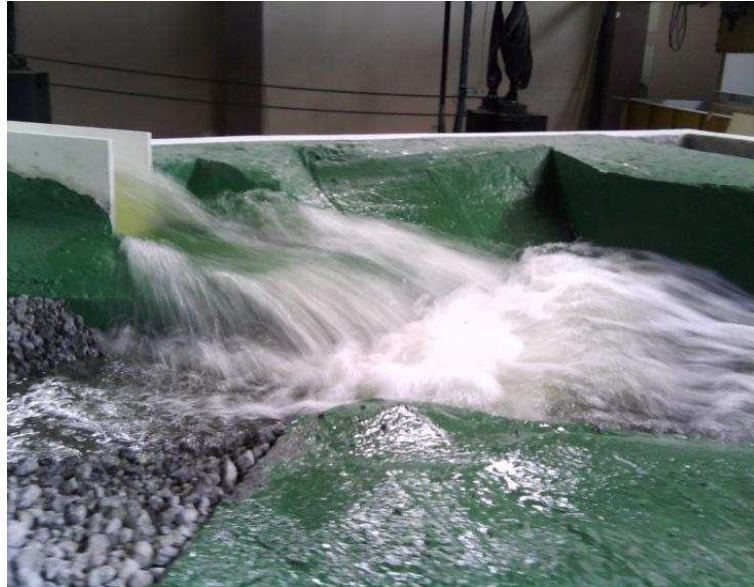
El alcance del chorro de salida, luego del dissipador, muestra que el flujo mantiene aún un elevado valor de la velocidad y por lo tanto, la altura de energía cinética es relativamente alta. Las fotografías siguientes permiten observar las características del flujo a la salida del dissipador en dirección del curso natural del río Paute. La representación en modelo del mismo se muestra en la siguiente fotografía.

**Fotografía No. 22:** Vista desde aguas abajo del tramo del río Paute representado en el modelo, a la salida del Túnel de Desvío y del dissipador de energía tipo Kumin.



La velocidad del flujo principal, aguas abajo de la estructura de disipación observada en el modelo, tiene la capacidad de limpiar el material suelto colocado en el cauce, como se observa en las fotografías Nos. 23 y 24.

**Fotografía No. 23:** Vista lateral del flujo de salida desde el dissipador tipo Kumin, hacia el curso natural del río Paute, con un caudal cercano a los  $900 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 24:** Formación del cuenco en el tramo del río Paute, representado con material suelto, luego de la operación del dissipador con el caudal de  $900 \text{ m}^3/\text{s}$ .





Considerando los valores medidos de profundidad de flujo en la zona de aproximación hacia la estructura de disipación de energía y salida del túnel de desvío, como representativos de la sección transversal, y suponiendo que las condiciones del movimiento pueden ser consideradas como unidimensionales se obtuvieron los valores del Número de Froude y del caudal unitario que tipifican al flujo de aproximación hacia el dissipador de energía tipo Kumin. Los valores del Número de Froude para el flujo de aproximación, en una sección circular, hacia el dissipador de energía tipo Kumin, se resumen en el siguiente cuadro.

**Cuadro No. 6:** Valores del parámetro adimensional Froude en la zona de aproximación hacia el dissipador de energía

Caudal total m <sup>3</sup> /s	Velocidad media del flujo m/s	Caudal TD m <sup>3</sup> /s	Caudal DI m <sup>3</sup> /s	Froude TD-9	q m <sup>3</sup> /s
224,51	11,46	199,76	24,75	2,42	24,95
397,75	16,27	197,99	199,76	3,13	44,19
998,79	17,90	898,03	100,76	2,01	110,98
104,30	9,77	104,30	0	2,62	11,59
498,51	16,67	498,51	0	2,92	55,39
940,45	18,41	940,45	0	2,30	104,49

Elaborado: José Juma

Los valores del número de Froude varían entre 2 y 3,13, para el rango de caudales de operación del dissipador de energía. La literatura técnica referida por los diseñadores, sin embargo, reporta que el rango de aplicación de la estructura para un funcionamiento aceptable, en términos del número de Froude del flujo de aproximación, está entre 2.5 a 10<sup>12</sup>.

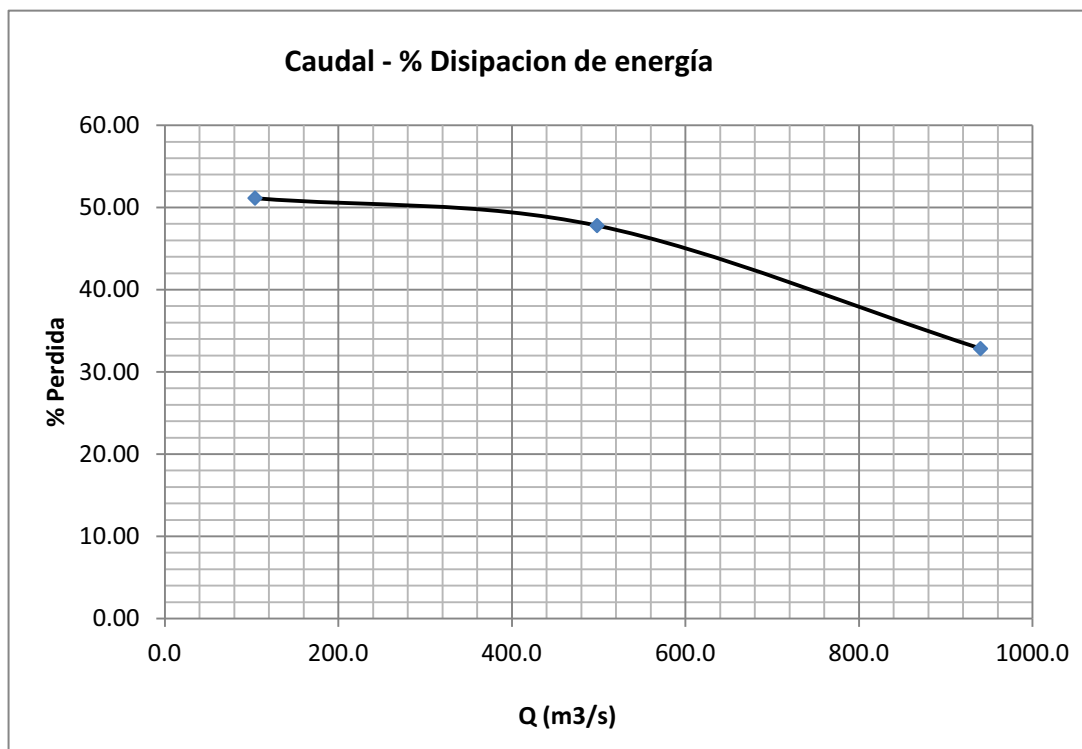
Respecto de los caudales unitarios ( $q = Q/B$ ) en la sección rectangular, la operación del diseño original en los ensayos del modelo está en el rango de  $q$  entre 25 y 110 m<sup>3</sup>/s/m. Este rango es coherente con el rango recomendado en la literatura técnica disponible para este tipo de estructuras, es decir que la estructura seleccionada en el diseño original se ubica dentro de los rangos de aplicación recomendados en la literatura técnica. Sin embargo, es necesario

<sup>12</sup> Castillo Luis. Universidad Politécnica de Cataluña-Disipadores de Energía. Barcelona 1987

considerar que en la realidad existe una fuerte asimetría del flujo de llegada al dissipador, además del efecto producido por el cambio brusco de la geometría de la sección transversal circular a la sección rectangular de la estructura de disipación. Estas condiciones no aportan para alcanzar una buena calidad en el flujo de entrada al dissipador de energía.

La relación entre los porcentajes de disipación de energía alcanzados en la estructura tipo Kumin con el caudal del flujo desde el Túnel de Desvío son bajos, pues varían por debajo del 50% para los caudales de 100 m<sup>3</sup>/s hasta el orden del 30% para los caudales cercanos a los 950 m<sup>3</sup>/s, como se muestra en la siguiente Figura No. 7. Los valores de calado obtenidos para estos cálculos se presentan en el Anexo 3 (F1-3A).

**Figura No. 7:** Curva de tendencia de la eficiencia del dissipador de energía en función del caudal para el túnel de desvío.



Elaborado: José Juma

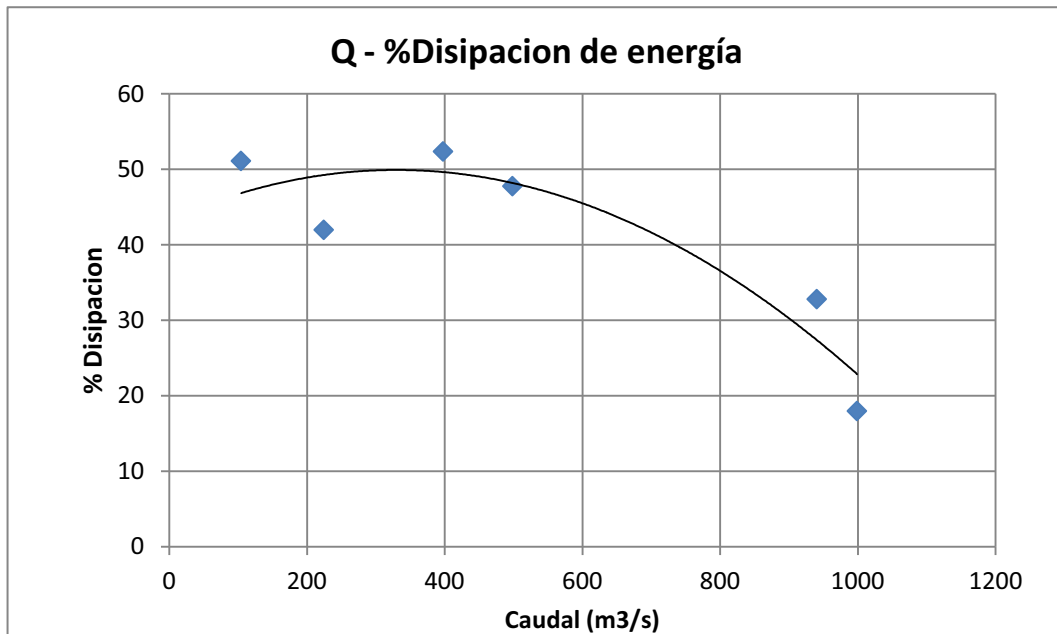
#### 4.3.4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

##### 4.3.4.1 Conclusiones

- En el tramo final del Túnel de Desvío, antes del ingreso del flujo hacia el dissipador de energía, la sección transversal circular resulta insuficiente para los caudales máximos como consecuencia de la presencia de la estructura tipo Kumin y el control que ésta ejerce.
- Para los caudales mencionados  $Q \leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$ , provenientes de la operación única de la Descarga Intermedia, el funcionamiento del dissipador de energía es medianamente satisfactorio. El embalsamiento del flujo y la elevación del flujo principal en la sección transversal extrema conduce al requerimiento de una protección adicional y resistente del hormigón de la base en el canal de entrega así como en el enrocado de protección sobre la margen izquierda del río Paute.
- La eficiencia de este dissipador tipo Kumin es baja para la serie de caudales ensayados. Si bien se menciona en la literatura técnica que este tipo de estructura es recomendable para el rango  $2,5 < Fr < 10$ ; en el presente caso, con valores de  $Fr$  entre 2 y 3.5 su eficiencia no es adecuada. Las velocidades de flujo a la salida del dissipador superan los valores admisibles para garantizar la estabilidad del enrocado de protección así como de las márgenes y cauce natural del río Paute.
- Gracias a las pruebas realizadas se pudo medir la longitud total del chorro de salida, teniendo valores de hasta 38 cm que en prototipo corresponde a 19 m, comprobando y garantizando el buen funcionamiento del enrocado en el punto de restitución al río, sin embargo es necesario tener un mantenimiento y control constante en este punto.

- No se reportan observaciones en el modelo de la zona de entrega al río Paute, en razón de que, en el plan de pruebas, se consideran los ensayos para la optimización de la zona de entrega al curso natural, una vez que se encuentre la geometría óptima del estructura de disipación al final del Túnel Desvío.
- El flujo de aproximación a la descarga está regida por muchas variantes una de las principales es la unión del caudales de la descarga intermedia y el túnel de desvío, generando grandes perturbaciones en este punto, presentándose un flujo fuertemente ondulatorio, que no puede ser considerado como unidimensional, sobre todo para caudales altos, esto disminuye la capacidad de disipación de energía a la salida.
- Cumpliendo con lo mencionado en el capítulo 2 en la justificación de la escala del modelo, los valores obtenidos de eficiencia del disipador representan cantidades mayores que en el prototipo concluyendo, que el funcionamiento de la disipación con la estructura normalizada tipo Kumin, se define como una estructura que no tiene la capacidad suficiente para la disipación de energía, tanto en el modelo y principalmente en el prototipo, a medida que aumenta el caudal su eficiencia disminuye (Ver Figura No.8).

**Figura No. 8:** Curva de tendencia de la eficiencia del dissipador de energía en función del caudal



Elaborado: José Juma

#### 4.3.4.2 Recomendaciones

- Cambio de la estructura de empate entre el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia. La EPN propone analizar las posibilidades, separación de los dos flujos supercríticos para dos descargas diferentes hacia el río Paute, en cuyo caso se garantiza una mejor calidad de flujo en todo el túnel de desvío y Descarga Intermedia, incluyendo además una mejora en el flujo de aproximación hacia el dissipador de energía.
- Rediseño del dissipador de energía, que incluya una transición de sección circular a rectangular, y válida para los valores del parámetro adimensional  $Fr$  esperados en el rango de caudales de operación,  $2 \leq Fr \leq 3,5$ .
- Rediseño de las protecciones requeridas o enrocados en la(s) zona(s) de entrega del flujo de agua al curso natural del río Paute, tanto desde la Descarga Intermedia como del Túnel de Desvío.

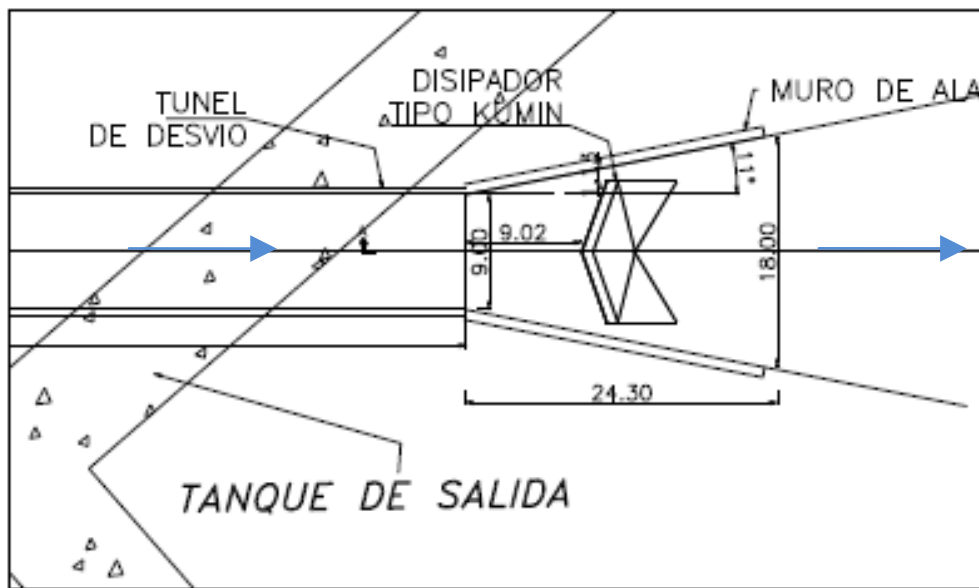
#### 4.3.5 MODIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN (MDE - 1)

Estas modificaciones se refieren a la Fase II del proyecto de modelación de la “CENTRAL HIDROELECTRICA SOPLADORA”. Debido al rendimiento insuficiente de la estructura de disipación de energía tipo Kumin, es necesario realizar modificaciones que puedan ofrecer un mejor funcionamiento de esta estructura. La variante en la geometría del dissipador de energía, propuesta, corresponde al cambio en la altura máxima del Kumin, que pertenece a la dimensión de los extremos laterales de este bloque. Este incremento en la altura se realiza tomando como referencia el valor esperado de profundidad media de flujo para el caudal máximo ensayado en la primera fase de la investigación. De esta forma el Kumin presenta una altura en sus extremos laterales igual a 7.38m, que es la profundidad media esperada para el caudal de  $998.79 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Se mantiene la ubicación del Kumin con respecto a la boca de salida del túnel en el sentido de flujo. La plataforma donde se ubica el Kumin presenta un ancho variable y creciente en el sentido de flujo, de tal manera que en el sitio de implantación del Kumin, éste presenta un ancho mayor que el original. Debido al cambio de altura y de ancho del dissipador, se modifican también las dimensiones restantes de la estructura, como se señala en el Plano No F2-DIS-M1 del Anexo No. 1 de planos.

La zona de aproximación hacia el Kumin presenta mayor ancho que en el diseño original. La sección transversal aguas abajo del bloque de impacto mantiene el ancho variable y creciente. En las Fotografías Nos. 25 y 26 se observa la implantación del dissipador con la modificación. La plataforma de la estructura de salida se inicia con el mismo ancho que el diámetro del túnel, es decir 9 m. En el sentido del flujo tiene una dimensión de 23.28 m. Las paredes laterales forman un ángulo de  $11^\circ$  con respecto al eje longitudinal. El ancho en la sección final de la plataforma alcanza a los 18 m.

**Figura No. 9:** Esquema de las modificaciones de la estructura de salida. Modificación MDE-1

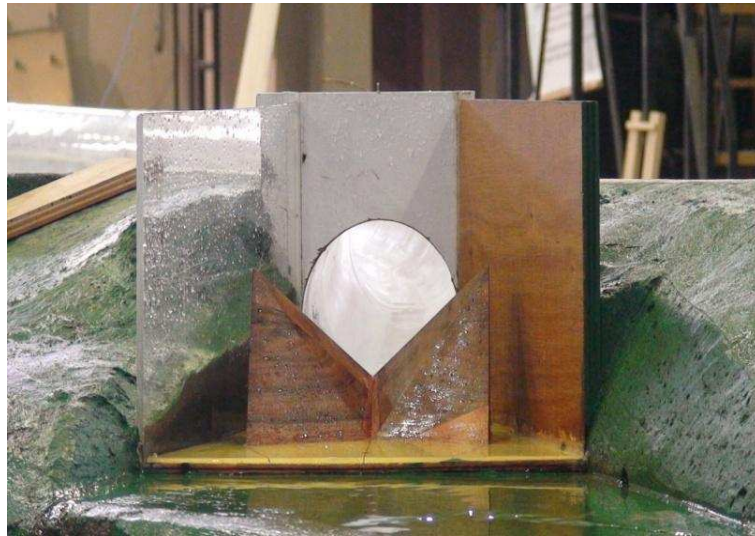


**Fuente:** Informe Fase II. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

**Fotografía No. 25:** Vista superior de la implantación de la estructura de disipación, tipo Kumin. Modificación MDE-1



**Fotografía No. 26:** Vista frontal de la implantación de la estructura de disipación, tipo Kumin. Modificación MDE-1



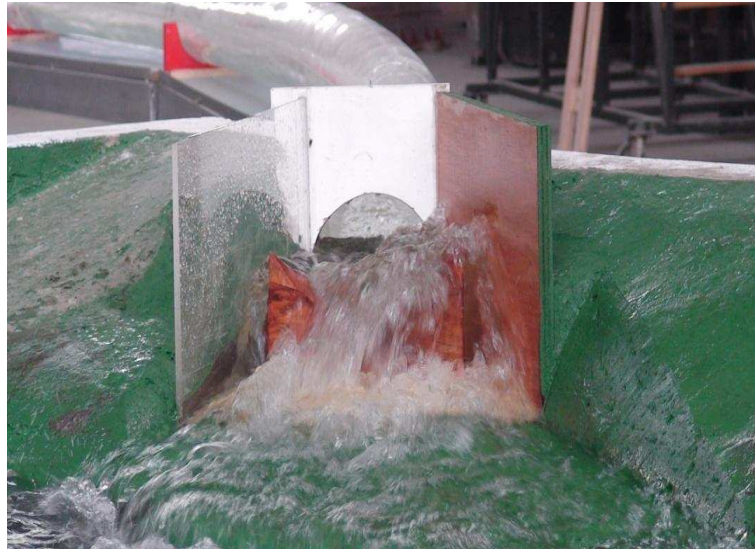
#### **4.4.5.1 Análisis del funcionamiento de la modificación (MDE – 1)**

Se observa que el flujo impacta en el cuerpo del Kumin para todo el rango de caudales ensayados.

El resalto oblicuo que se forma en el tramo final del túnel de desvío se produce debido al control que provoca la presencia del Kumin a corta distancia desde la boca de salida y depende del caudal que circula por el túnel. El flujo incide sobre el bloque de impacto con una fuerte concentración hacia la margen izquierda, como resultado de las ondas cruzadas que se forman dentro del túnel. El flujo, por lo tanto incide con una distribución en planta no uniforme, que provoca elevaciones muy diferentes en los extremos laterales del Kumin, como se observa en la fotografía No. 27.



**Fotografía No. 27:** Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del dissipador tipo Kumin con Caudal aproximado = 800 m<sup>3</sup>/s, se puede observar el control de flujo por el dissipador y el ingreso no uniforme del flujo.

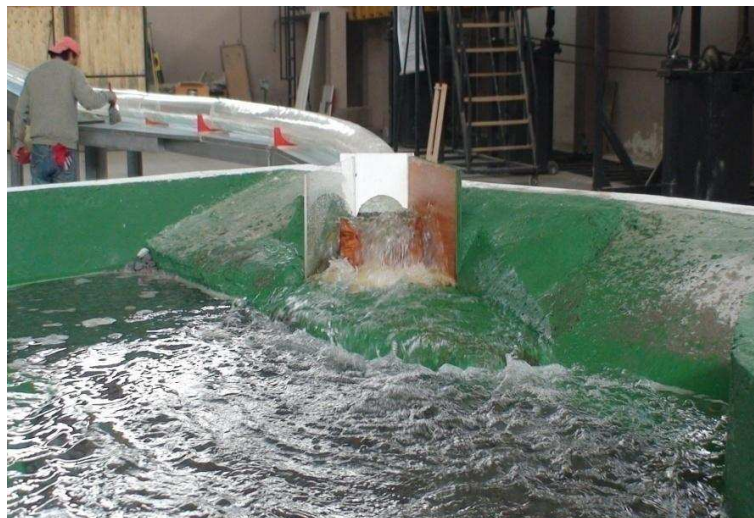


Entre las paredes laterales de la estructura de disipación de energía y los extremos del Kumin se forman pequeños espacios por donde el flujo pasa con gran velocidad generando separación hacia aguas abajo de los extremos del bloque. Aguas abajo del Kumin se observa que el flujo cae impactando sobre la parte final de la plataforma y/o el enrocado sobre la margen lateral del cauce del río. La velocidad del flujo sobre la parte final de la plataforma y enrocado es bastante alta hasta llegar propiamente al lecho del río. Cuando el nivel de la superficie libre en el cauce es menor a la altura de las terrazas laterales de inundación, el flujo que ingresa al mismo tiene suficiente capacidad de arrastre de tal manera que dependiendo del caudal de descarga todo o parte de este material suelto es empujado hacia aguas abajo. En el anexo 2 (F2-2B) se muestran la estructura con diferentes caudales.

**Fotografía No. 28:** Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del dissipador tipo Kumin con Caudal =  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Modificación MDE-1. Sin control aguas abajo



**Fotografía No. 29:** Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del dissipador tipo Kumin con Caudal =  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Modificación MDE-1. Sin control aguas abajo



**Fotografía No. 30:** Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del dissipador tipo Kumin con Caudal =  $900 \text{ m}^3/\text{s}$ . Modificación MDE-1. Sin control aguas abajo



**Fotografía No. 31:** Vista frontal del flujo de salida con funcionamiento del dissipador tipo Kumin con Caudal =  $900 \text{ m}^3/\text{s}$ . Modificación MDE-1. Sin control aguas abajo



Cuando los niveles de la superficie libre del flujo en el cauce del río Paute es mayor a la altura de las terrazas laterales de inundación, se observa que la capacidad de arrastre del material sólido se reduce considerablemente. Esto se muestra en las fotografías No.32 y 33.

**Fotografía No. 32:** Vista lateral del flujo de salida con funcionamiento del dissipador. Modificación MDE-1. Con control aguas abajo = 6.00m



**Fotografía No. 33:** Formación del cuenco de socavación en el río Paute, representado con material suelto, luego de la operación del dissipador. Modificación MDE-1. Con control de aguas abajo a 6.00m.



#### 4.3.5.2 Conclusiones y recomendaciones de modificaciones

- Una estructura de disipación por impacto, del tipo Kumin, resulta poco efectiva para las características hidrodinámicas del flujo a la salida del túnel

de desvío (falta de uniformidad en la profundidad de agua a lo largo de la sección transversal).

- Si se aumenta la altura de impacto o de choque en la estructura se mejora el porcentaje de disipación de energía a la salida, pero se obstruye la sección del túnel, para los caudales mayores a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se presenta un efecto de embalsamiento con la consecuente pérdida de capacidad hidráulica del tramo final del túnel. En todo caso, la calidad del flujo de salida de la estructura de disipación de energía no garantiza la estabilidad del zampeado, ni del enrocado, ni del cauce principal del río en el tramo de descarga debido a la presencia de chorros de alta velocidad que impactan en las diferentes zonas de la estructura y del río.
- Eliminar toda estructura de impacto en la sección de salida del túnel o de la descarga intermedia, como estructura para disipación de energía
- Aumentar la curvatura en el trazado en planta del túnel, para disminuir el efecto que da lugar a la presencia de ondas; en este sentido, se debe mejorar el flujo de aproximación a la estructura de disipación
- Analizar la posibilidad de ubicar una estructura de disipación de energía en el tramo final del túnel de desvío, que sea adecuada para el rango de valores de los números adimensionales de Froude obtenidos en el flujo de salida del túnel.
- Bajar la cota de la sección de salida del túnel para incrementar el efecto de sumergencia en la descarga.

## CAPITULO 5

# DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR RESALTO HIDRÁULICO EN CANALES CON EXPANSIÓN

### 5.1. INTRODUCCIÓN

El resalto hidráulico produce una reducción de velocidad generando una rápida variación de transición de un flujo supercrítico a un flujo subcrítico en canales abiertos. Es un fenómeno usado para disipar excesos de energía hidrodinámica, durante la reducción de velocidad, una considerable porción de energía inicial es disipada en calor. Las principales características del resalto hidráulico son:

- Flujo con alta turbulencia,
- Pulsaciones en el cuerpo del resalto,
- Generación de calados con olas,
- Ingreso de aire
- Disipación de energía junto con la producción de turbulencia,
- Erosión potencial y
- Generación de ampliación y sonidos en el flujo.

#### 5.1.1 RESALTO HIDRÁULICO CLÁSICO<sup>13</sup>

El resalto formado en un flujo, liso y en un canal rectangular horizontal de ancho constante es conocido como resalto hidráulico clásico.

En el resalto clásico, la superficie de agua crece abruptamente al pie del resalto, con una ubicación que oscila alrededor de la posición media. La superficie continua creciendo aguas abajo hasta llegar a un nivel constante. La altura del flujo al inicio es conocida como  $h_1$ , y la altura del flujo subcrítico al final como  $h_2$ ; las dos alturas son conocidas como calados secuenciales, estos valores se los

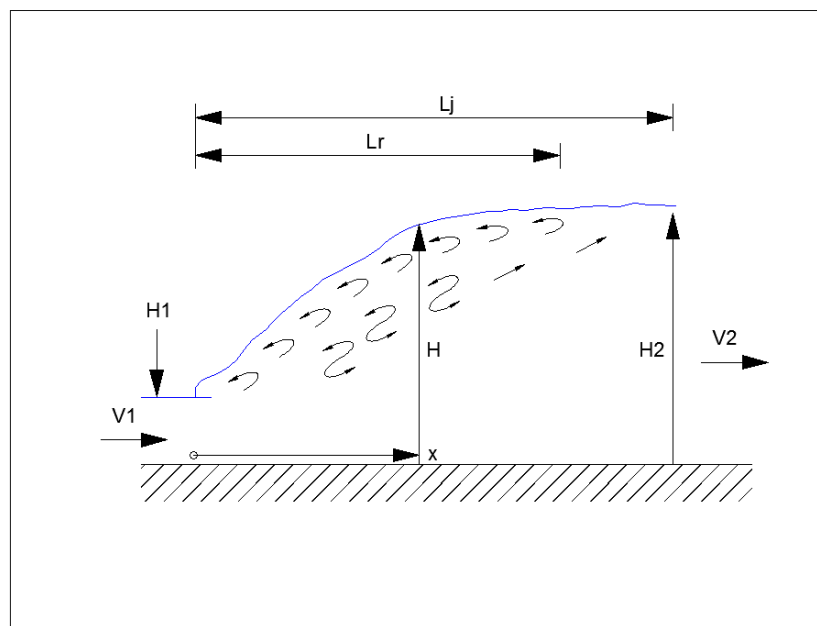
---

<sup>13</sup> A.A.Balkema/Rotterdam/Brockfield, 1995, ENERGY DISSIPATORS

representa en la figura No 10. El flujo supercrítico está caracterizado por la altura  $h_1$  y la velocidad  $V_1$ . Estos dos valores junto con la aceleración de la gravedad,  $g$ , originan la forma del número de Froude supercrítico:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}}$$

**Figura No. 10:** Resalto hidráulico clásico



**Fuente:** ENERGY DISSIPATORS, A.A.Balkema

El valor de  $F_1$  es usado para especificar el tipo de resalto si es ondular, débil, oscilante, permanente o resalto fuerte, (ver figura No. 12) para predecir sus dimensiones características. Si la velocidad de distribución es esencialmente uniforme y la distribución de presión hidrostática, ambos al inicio y al final del salto, y si las fuerzas de rozamiento en el canal y las velocidades de fluctuación en la turbulencia al inicio y al final son despreciables, la relación de calados por el remanso está dada por el conocida ecuación de momentum de Belanger:

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

Para números de Froude grandes como  $F_1=2$  la ecuación anterior puede ser aproximada como:

$$Y = \sqrt{2}F_1 - \frac{1}{2}$$

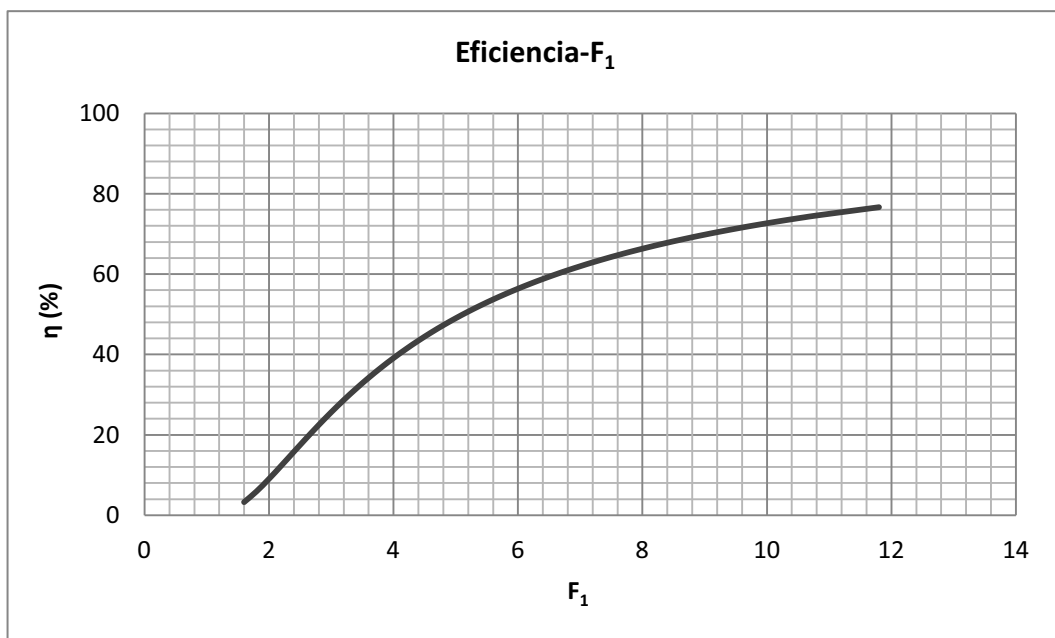
Esto demuestra que la relación de calados esta directamente proporcionada al  $F_1$ .

La eficiencia  $\eta = \Delta H/H_1$ , donde  $\Delta H = H_2-H_1$  es la perdida de energía específica en el resalto, y  $H_1 = h_1 + Q^2 / (2gb^2 \cdot h_1^2)$ . Esta puede ser expresada como:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right)^2$$

Esta ecuación indica una pequeña pérdida (<30%) para  $F_1 < 3$ , una pérdida del 50% para  $F_1 = 5$  y una perdida sobre 70% para  $F_1 > 9$ , como se puede observar en la siguiente figura:

**Figura No. 11:** Resalto hidráulico clásico



**Fuente:** ENERGY DISSIPATORS, A.A.Balkema

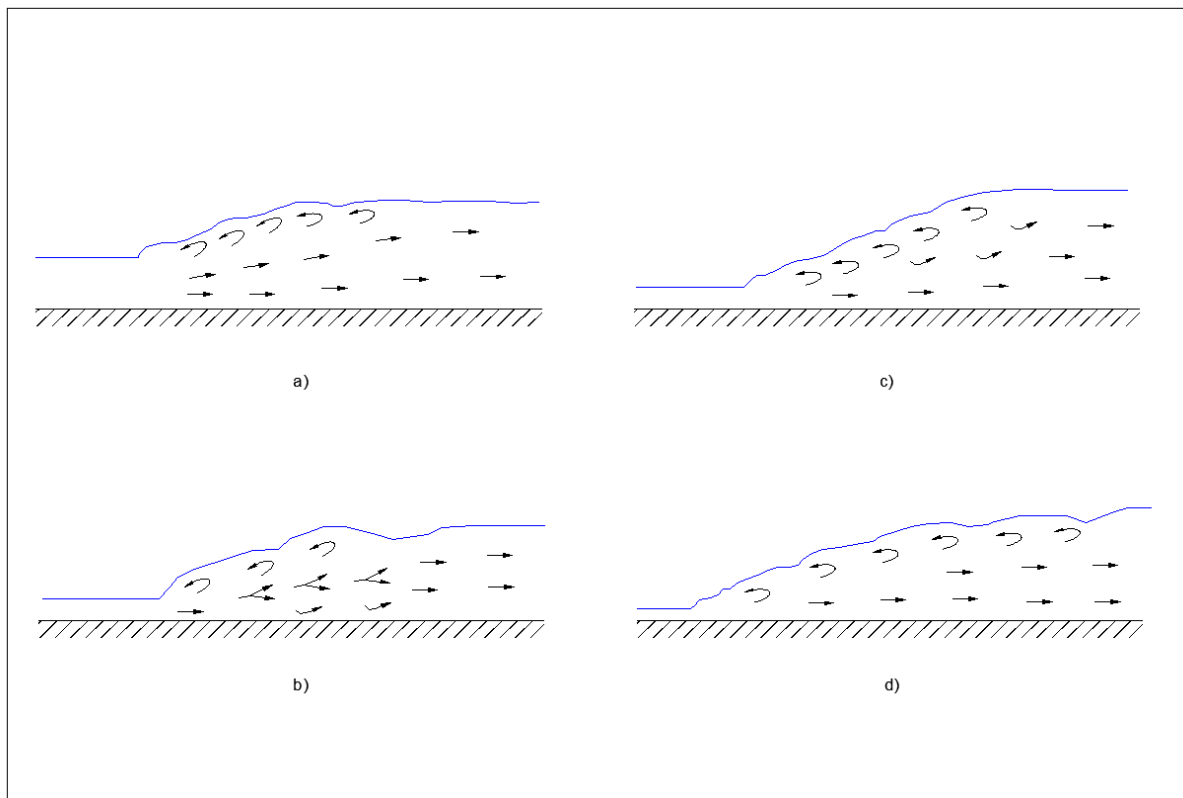


Para resaltos hidráulicos con pequeños números de Froude  $1 < F_1 < 1.7$ , es llamado resalto ondular, por la presencia de ondulaciones en la superficie, este tipo resaltos no disipa mucha energía.

El resalto débil ocurre en  $1.7 < F_1 < 2.5$  con pequeñas eficiencias, las velocidades son ligeramente uniforme (figura No. 12a). La transición oscilante ( $2.5 < F_1 < 4.5$ ) tiene un efecto pulsatorio y esto origina ondas viajeras de periodo irregular. Estos saltos (Figura No. 12b) se producen aguas abajo.

El resalto permanente ( $4.5 < F_1 < 9$ ) tiene la mejor forma, y una considerable eficiencia, es compacto y de apariencia estable, con pequeñas ondulaciones (figura No. 12c) además es poco sensible a variaciones de  $Y_c$ . El resalto fuerte (figura No. 12d) ocurre en  $F_1 > 9$  la acción del resalto es áspera pero efectiva, debido a los golpes intermitentes generan ondas hacia aguas abajo.

**Figura No. 12:** Formas de los resaltos hidráulicos clásicos.



**Fuente:** ENERGY DISSIPATORS, A.A.Balkema

## 5.1.2 RESALTO EN CANALES CON EXPANSIÓN<sup>14</sup>

Cuando las características del cauce son tales que no proporcionan suficiente calado para un correcto desarrollo del resalto puede recurrirse a excavaciones en el cuenco o a la disposición del mismo de dientes deflectores, bloques de impacto, aumento de pendiente, etc., no obstante dichas medidas resultan insuficientes o económicamente inviables, por lo que se recurre al diseño de cuencos divergentes.

### 5.1.2.1 RESALTO CON EXPANSION BRUSCA

Diversos estudios encontraron los siguientes elementos principales que intervienen en el resalto con expansión brusca:

- Un flujo inferior al calado en el punto de expansión,
- Un flujo negativo en la sección de expansión,
- Mayor erosión del cuenco,
- Flujo transversal, umbral central

El último punto únicamente es efectivo cuando se produce un flujo simétrico y un resalto compacto. Se genera vorticidades en las esquinas de la expansión (figura No. 13a), además una aceptable distribución de velocidades en el calado de salida provocando pequeñas olas en el resalto.

Este tipo de resalto es óptimo para Froude  $F_1 > 3$ , debido a que se produce un resalto más compacto y un flujo menos turbulento.

---

<sup>14</sup> A.A.Balkema/Rotterdam/Brockfield, 1995, ENERGY DISSIPATORS

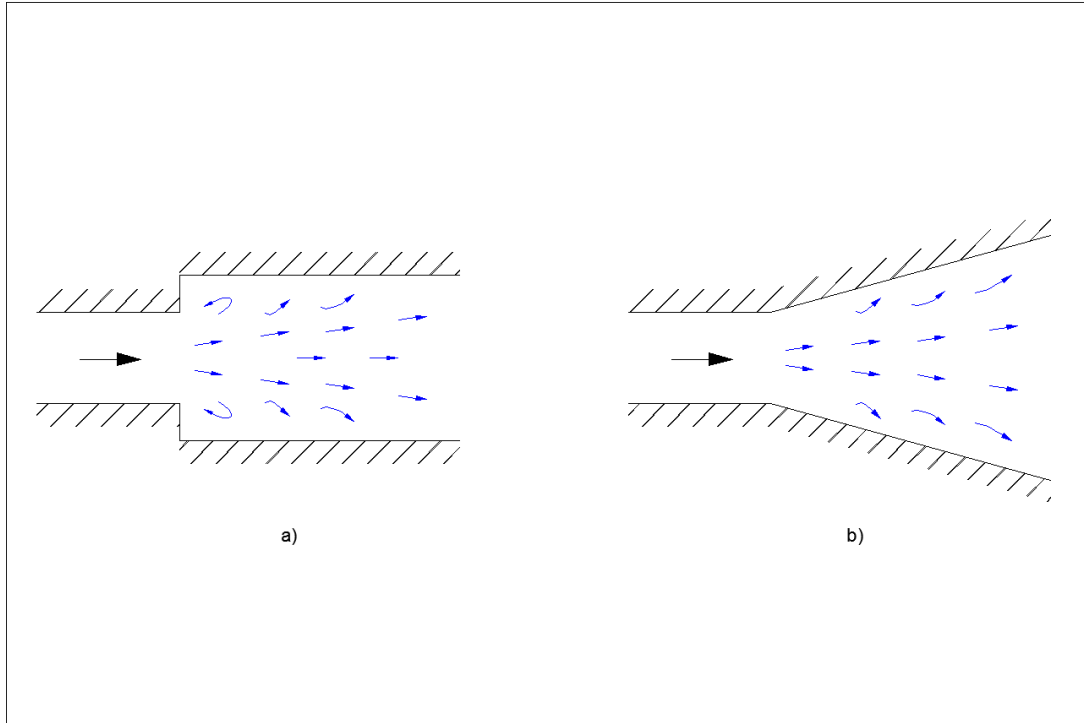
### 5.1.2.2 RESALTO CON EXPANSIÓN GRADUAL

El resalto en una expansión gradual y paredes verticales rectas, puede ser tratado como una región de un resalto hidráulico circular, es decir las líneas de flujo pueden ser asumidas radiales (Fotografía No.40)

Las siguientes ventajas son predominantes frente a cuencos prismáticos:

- La sección de control aguas arriba tiende a ser más pequeña,
- El calado conjugado es menor,
- La captación del material de arrastre puede ser usado para altas variaciones de calados conjugados,
- La eficiencia es mejor para flujos bajos con Froude  $F_1 < 4$ .

**Figura No. 13:** Flujo de secciones con expansión.



**Fuente:** ENERGY DISSIPATORS, A.A.Balkema

## 5.2 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON EL DISEÑO ORIGINAL

### 5.2.1 ESTRUCTURA CON EXPANSIÓN GRADUAL (MDE – 2)

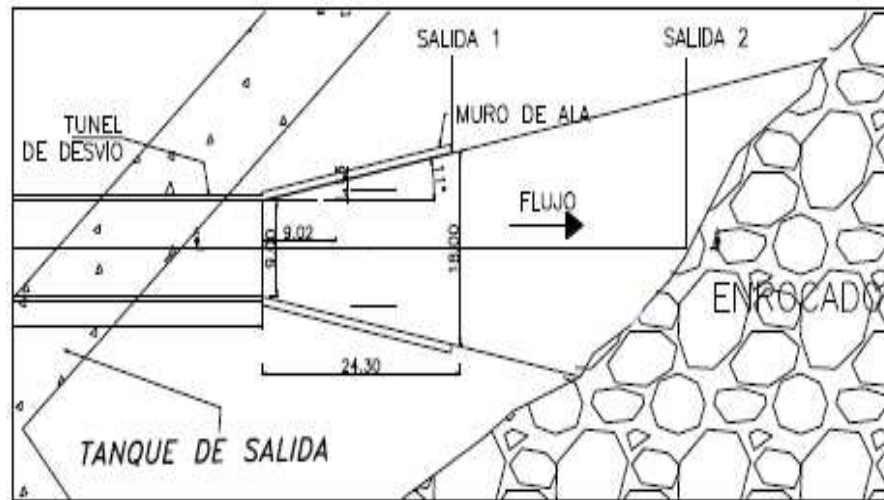
Esta estructura pertenece a la Fase II del proyecto de modelación, en esta segunda variante se procede a eliminar la estructura de disipación tipo Kumin, como se esquematiza en la Figura No. 14, quedando únicamente la plataforma de entrega a continuación de la sección transversal final del túnel de desvío. En la fotografía No.34 se observa una vista en planta de la geometría de la modificación MDE-2, en el anexo 1 en el plano No. F2-DIS-M2 se muestra las modificaciones en esta alternativa. Por medio de mediciones de la velocidad en la salida de la estructura, se evalúa que la disipación de energía, sin el bloque de impacto. Sin embargo se analiza el funcionamiento de esta configuración con variación de los niveles de superficie libre del flujo en el cauce del río Paute.

**Fotografía No. 34:** Vista frontal de la implantación de la plataforma de salida sin estructura de disipación, tipo Kumin. Modificación MDE-2.



En el siguiente esquema se presenta la ubicación de las secciones transversales donde se registraron las velocidades medidas.

**Figura No.14:** Esquema general para el cálculo de energía disipada mostrando los puntos de análisis. Modificación MDE-2.

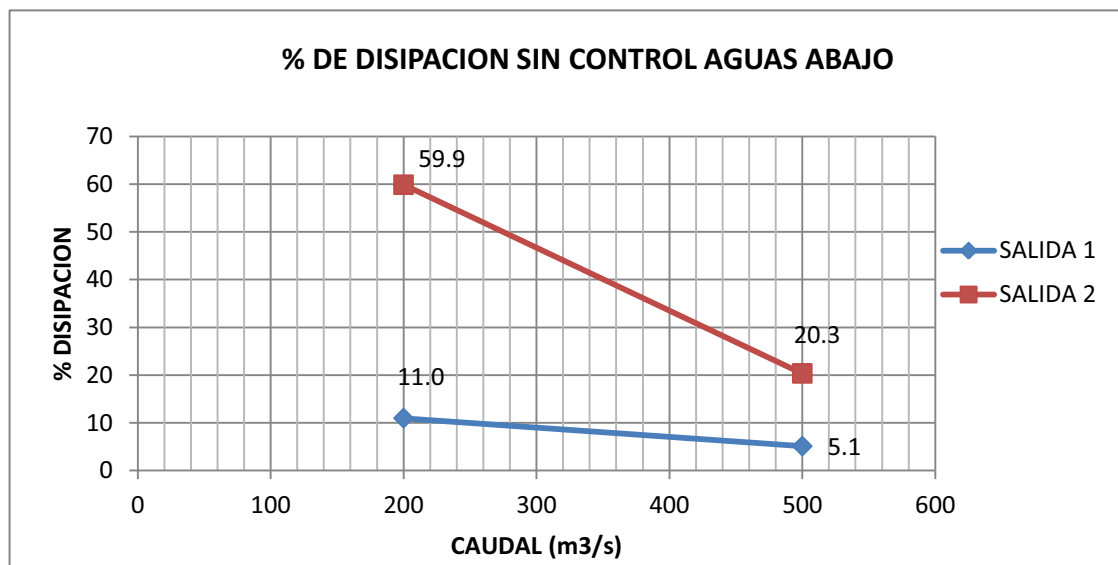


**Fuente:** Fase II. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

### 5.2.1.1 Análisis del funcionamiento de la modificación con sección con expansión

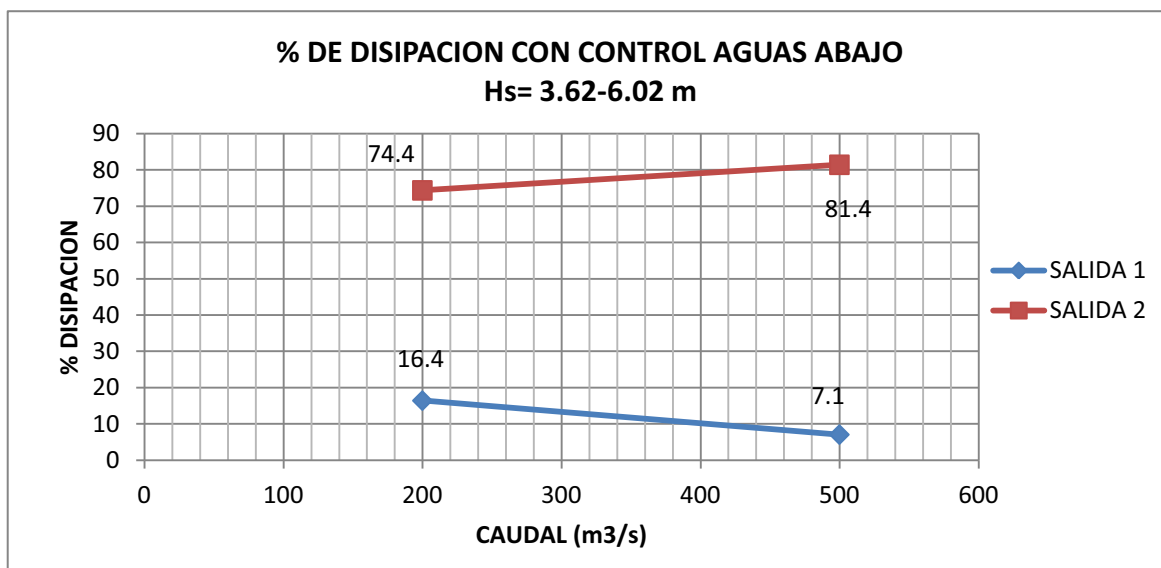
Los resultados obtenidos sobre valores estimados de disipación de energía, sin el control desde aguas abajo y con éste, se muestran en las Figuras Nos. 15 y 16.

**Figura No. 15:** Porcentaje de disipación de energía sin control desde aguas abajo. Modificación MDE-2.



Elaborado: José Juma

**Figura No. 16:** Porcentaje de disipación de energía con control desde aguas abajo. Modificación MDE-2.



**Elaborado: José Juma**

Se observa que los valores más altos de eficiencias en la disipación de energía para la operación de la plataforma de entrega sin control de niveles en el cauce del río, se obtiene al final del enrocado de protección, inmediatamente antes de llegar al cauce principal del río, para los caudales más bajos. Sin embargo estos valores máximos están en el orden del 60% para el caudal aproximado de 200 m<sup>3</sup>/s, y disminuye hasta el 20% para los caudales del 500 m<sup>3</sup>/s. Para la sección transversal que coincide con el final de la plataforma de entrega estos porcentajes de disipación se reducen aun más, llegando apenas al 16% para caudales bajos y 5% para el caudal más alto ensayado. En conclusión, la disipación de energía con la geometría de canal con expansión, para la condición de descarga sin control de aguas abajo, no es recomendable.

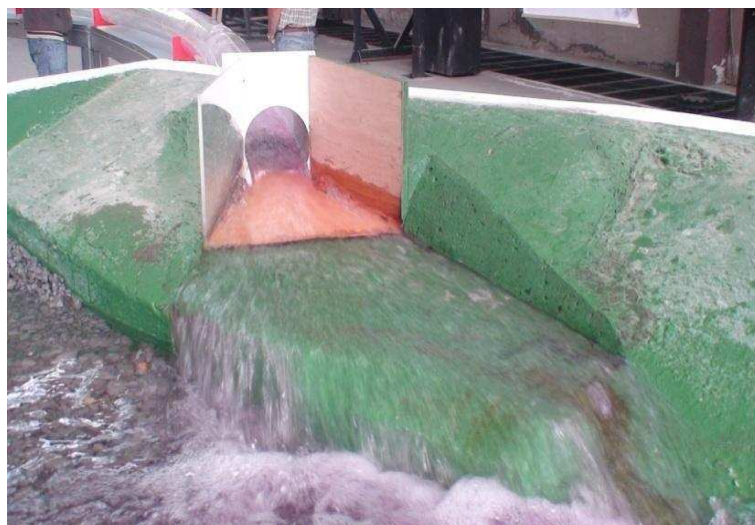
Para el caso en que los niveles aguas debajo de la estructura de salida se incrementan hasta en 6 m por encima de la margen izquierda del cauce principal se observa que en la sección final del enrocado la disipación de energía se eleva llegando a porcentajes entre el 74% al 81% para los caudales de 200 m<sup>3</sup>/s y 500 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. En la sección al final de la plataforma de entrega los porcentajes de disipación alcanzados son similares a los observados sin control de aguas abajo. El resalto se presenta en diferentes puntos variando con el

caudal, para caudales menores el resalto no se presenta en los puntos de medida teniendo un bajo porcentaje de disipación de energía, no obstante para pruebas realizadas con control aguas abajo se obtuvo una formación de resalto efectivo, llegando a valores de hasta 81%.

**Fotografía No. 35:** Vista superior del funcionamiento de la estructura de salida, sin la estructura de impacto o dissipador a la salida. Modificación MDE-2.



**Fotografía No. 36:** Vista frontal del funcionamiento de la plataforma de entrega, sin estructura de impacto o dissipador. Modificación MDE-2. Sin control de niveles de superficie libre en el cauce del río. Paute.



En las siguientes Fotografías Nos. 37 y 38 se puede observar el comportamiento del flujo de salida desde el Túnel de Desvío para caudales diferentes. En el anexo 2 (F2-2B) se muestran las fotografías del funcionamiento de este tipo de estructura, los datos obtenidos de velocidades se muestran en el anexo 3 (F2-3B). Se realizaron varias pruebas para examinar y corregir la calidad del flujo en las secciones transversales de salida y de entrega del flujo al cauce natural. El resalto esperado por este tipo de estructura es circular como se observa en la Fotografía No.40. Se observa la tendencia al fenómeno intenso de socavación para caudales mayores a  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ ; se producen ondas en las paredes internas de los muros laterales para los caudales de valor superior a los  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . como se observa en las Fotografías No. 41 a 42.

**Fotografía No. 37:** Vista frontal del funcionamiento de la estructura de salida con  $Q_{TD}=50 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Modificación MDE-2.





**Fotografía No. 38:** Vista frontal del funcionamiento de la estructura de salida con  $Q_{TD}=100\text{m}^3/\text{s}$ . Sin control desde aguas abajo. Modificación MDE-2.



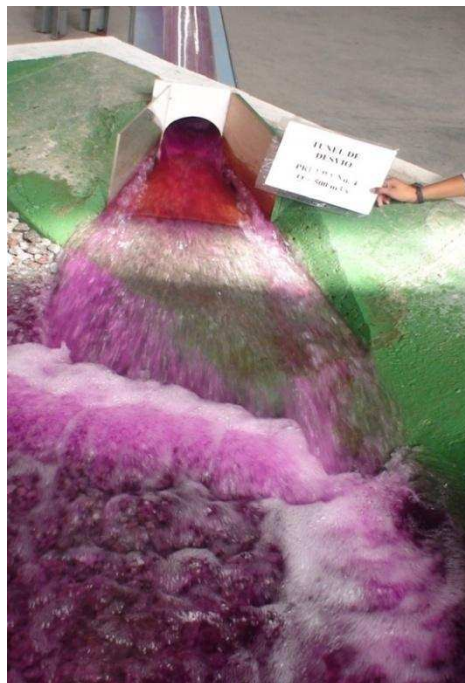
**Fotografía No. 39:** Vista frontal del funcionamiento de la estructura de salida con  $Q_{TD}=200\text{m}^3/\text{s}$ . Sin control desde aguas abajo. Modificación MDE-2.



**Fotografía No. 40:** Resalto circular en estructura de salida con  $Q_{TD}=200\text{m}^3/\text{s}$ . Modificación MDE-2.



**Fotografía No. 41:** Vista frontal del funcionamiento de la estructura de salida con  $Q_{TD}=500\text{m}^3/\text{s}$ . Sin control desde aguas abajo. Modificación MDE-2.



**Fotografía No. 42:** Vista superior del funcionamiento de la estructura de salida con  $QTD=951m^3/s$ .  
Modificación MDE-2.



#### 5.2.1.2 CONCLUSIONES

- En la Figura No. 16, se presentan los resultados respecto al porcentaje de disipación de energía, con control desde aguas abajo, con profundidades de sumergencia que van desde los 3.62 m hasta los 6.02 m (en prototipo). Estas profundidades corresponden al rango calculado de variación de las profundidades de agua en el río Paute. Existe un aumento importante en el porcentaje de disipación de energía, en particular, en el punto de salida No. 1: la presencia del colchón de agua disminuye el efecto de las altas velocidades y disminuye notablemente la presencia de socavación intensa en la zona de entrega al río.
- La calidad del flujo de salida no garantiza la estabilidad del enrocado ya que produce grandes zonas de socavación en el punto de restitución al río, debido a los chorros con altas velocidades.

#### 5.2.1.3 RECOMENDACIONES

Para un mejor funcionamiento de los ensayos con el Diseño Definitivo de las Obras, se recomienda introducir los siguientes cambios:

- Aumentar la longitud del tramo recto en el túnel de desvío, tramo ubicado entre la segunda curva horizontal y el ingreso al dissipador; de tal modo, que se logre un flujo con la profundidad de agua distribuida uniformemente a lo ancho de la sección transversal rectangular de base de la sección baúl.
- Modificar la sección transversal del flujo a la salida del túnel, por medio de una transición desde la geometría circular hacia una sección tipo baúl. Se logrará una mejor distribución del flujo supercrítico o rápido en la aproximación a la entrega al río Paute.
- Separar el flujo de la descarga intermedia del Túnel de desvío para así tener un análisis más preciso sobre la disipación de energía en cada punto, además se lograría que el flujo en el punto de restitución al río sea uniforme.

### **5.2.3 MODIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA DE DISIPACIÓN FASE III**

El principal cambio previsto en la estructura de disipación de energía definido para la Fase III de la investigación, se refiere a que cada túnel tiene su propia estructura independiente. La ubicación de éstas, sin embargo es próxima en el mismo tramo del río Paute. Adicionalmente los resultados de las fases I y II en el único dissipador de energía previsto en el diseño original, permitió recomendar las siguientes modificaciones para mejorar su funcionamiento hidráulico:

- a. Estructura de Disipación y Entrega del túnel de desvío
  - i. Eliminación de bloque de impacto tipo Kumin.
  - ii. Cambio de la geometría circular de la sección de salida del túnel de desvío por una tipo baúl.
  - iii. Plataforma de entrega con ancho creciente en el sentido de flujo.

- iv. Disminución de la cota de implantación de la estructura al menos 6 m por debajo de la cota prevista en el diseño original.
- b. Estructura de Disipación y Entrega del Túnel de la Descarga Intermedia:
- i. Introducción de una estructura propia para la Descarga Intermedia, ubicado a corta distancia aguas arriba de la estructura de disipación y entrega del túnel de desvío.
  - ii. Aplicación de las recomendaciones definidas para optimizar la estructura de disipación de energía y entrega del túnel de desvío, considerando el diferente rango de caudales de operación

#### **5.2.3.1 Descripción de la geometría definida para la Estructura de Disipación de Energía y Entrega de caudales del Túnel de Desvío para la Fase III de la investigación**

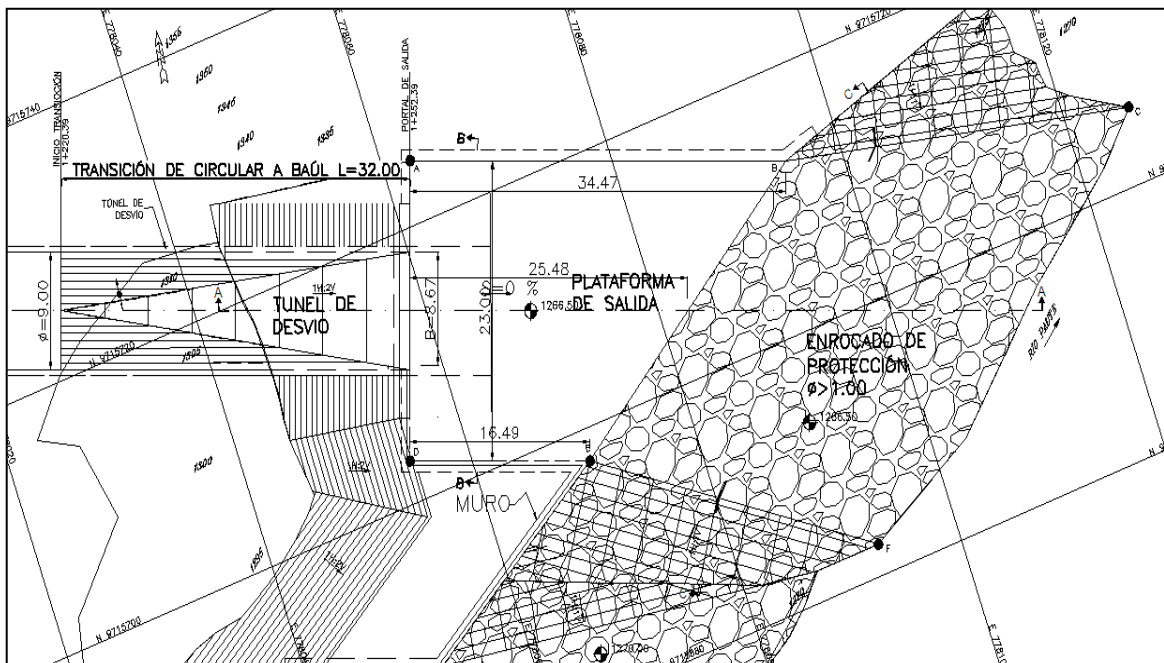
Como se indica en los Planos No. F3-DEF-P4 y F3-DEF-M2 del anexo 1, luego de la segunda curva horizontal del Túnel de Desvío, se tiene la transición final cuyo desarrollo alcanza una longitud de  $L = 32$  m, con una pendiente  $S = 2\%$ . La sección inicial de esta transición se ubica en la abscisa  $1+220.39$  m y presenta una geometría circular de diámetro  $\Phi = 9$  m, que corresponde al diámetro del túnel de desvío. La sección final de la transición, que corresponde a la abscisa  $1+252.39$ , tiene una geometría tipo baúl cuya base es  $B = 9$  m y su altura  $H = 9$  m. La pendiente longitudinal de la transición de aproximación a la salida del túnel es del  $2\%$  y las cotas inicial y final de la misma corresponden a  $1267.14$  msnm y  $1266.50$  msnm, respectivamente.

Aguas abajo de la sección final del túnel se tiene la estructura de entrega propiamente dicha conformada por una plataforma horizontal con ancho constante que forma un cambio brusco entre la sección de salida del túnel y la de la estructura de disipación. La longitud de la plataforma de salida en el sentido del

flujo es de  $L = 25.48$  m, terminando en la abscisa 1265.99 msnm, en donde se inicia el enrocado de protección ubicado sobre la margen izquierda del río. Siguiendo los contornos laterales de la plataforma de entrega se tienen los muros laterales paralelos que alcanzan una altura de 11.50 m.

En la Figura No.17 se presenta la conformación en planta de la estructura de salida definida para la Fase III de la investigación.

**Figura No.17:** Vista en planta de la modificación de la estructura de salida para el túnel de desvío de la Fase III.



**Fuente:** Informe Fase III. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

Sobre el cauce del río se colocó material pétreo, suelto con tamaño medio entre 3 cm y 5 cm. En las siguientes fotografías se observa la geometría y las características constructivas de la estructura de disipación de energía y entrega de caudales del Túnel de Desvío, construida en el modelo a escala reducida en el laboratorio del CIERHI.

**Fotografías Nos. 43 y 44:** Vista en planta y vista frontal de la geometría propuesta para la zona de descarga o entrega desde el Túnel de Desvío. Fase III



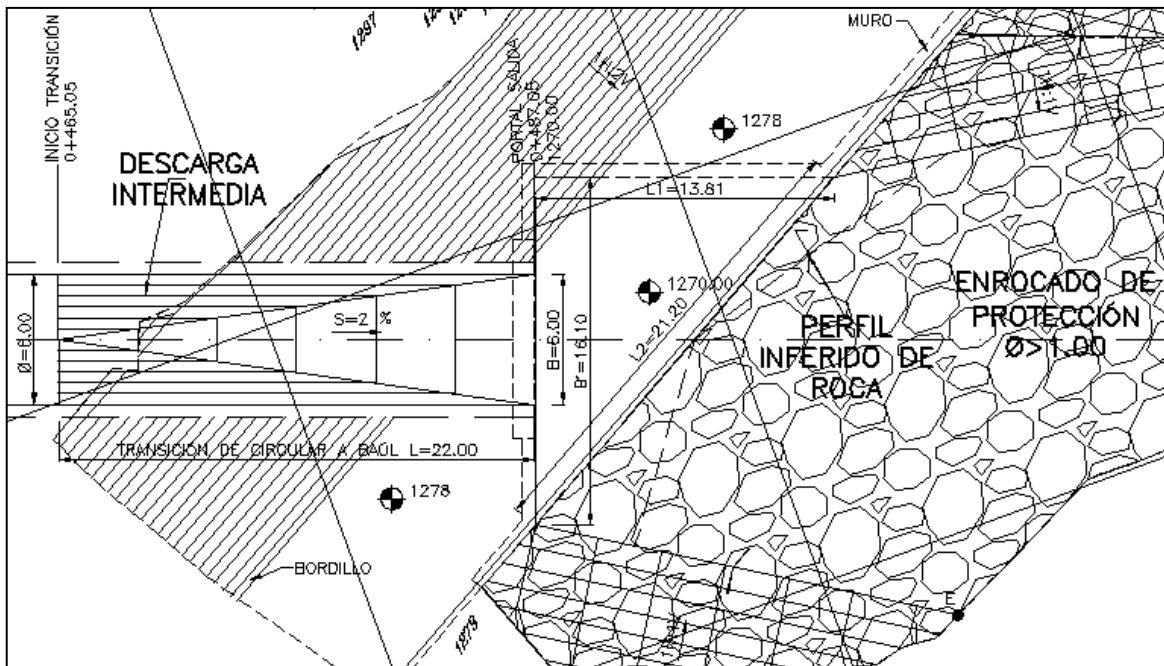
### 5.2.3.2 Descripción de la geometría definida para la Estructura de Disipación de Energía y Entrega de caudales del Túnel de Descarga Intermedia para la fase III de la investigación

En el túnel de descarga intermedia se tiene también una transición como elemento de aproximación hacia la sección final. Esta transición se desarrolla con una longitud  $L = 22$  m y una pendiente  $S = 2\%$ . La sección inicial tiene la geometría del túnel de descarga intermedia, es decir circular con diámetro  $\Phi = 6$  m. Esta sección se ubica en la abscisa 0+465.05. La sección final presenta una geometría tipo baúl con una base  $B = 6$  m y una altura  $H = 6$  m; se ubica en la abscisa 0+487.05. Las cotas de ubicación del inicio y fin de la transición de aproximación hacia la salida del túnel de Descarga Intermedia corresponden a 1270.44 msnm y 1270 msnm, respectivamente.

Aguas abajo de la sección de salida del túnel de Descarga Intermedia se desarrolla un ensanchamiento brusco cuya losa presenta una geometría triangular con las siguientes dimensiones;  $B' = 16.10$  m,  $L1 = 13.81$  m y  $L2 = 21.20$ ; la longitud en el eje de la plataforma de entrega es  $L = 6.99$  m y se inicia en la abscisa 0+487.05 hasta la abscisa 0+494.04. A continuación se desarrolla un enrocado de protección, cuya longitud en el eje de la estructura alcanza a 31.55

m. Los muros laterales dispuestos a cada lado de la plataforma de entrega alcanzan una altura constante de  $H = 7.40$  m. En la siguiente figura se muestra la conformación geométrica de la estructura de disipación de energía y entrega de caudales del túnel de Descarga Intermedia.

**Figura No.18:** Vista en planta de la modificación de la estructura de salida para la descarga intermedia de la Fase III.



**Fuente:** Informe Fase II. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

Sobre el cauce del río se colocó material pétreo, suelto con tamaño medio entre 3 cm y 5 cm. En las siguientes fotografías se observan las características geométricas y constructivas de la estructura de disipación de energía y entrega de caudales del túnel de la Descarga Intermedia, construida en el modelo escala 1:50. Lo descrito se presenta en los Planos No. F3-DEF-P3 y F3-DEF-M2 del anexo 1.



**Fotografías No. 45 y 46:** Vista en planta y vista frontal de la geometría propuesta para la estructura de disipación de energía y entrega al río Paute en la Descarga Intermedia. Fase III.



En el Anexo en el plano No. F3-DEF-M1 se presenta el Planos de Diseño Modificado del modelo construido en el laboratorio del CIERHI.

### 5.2.3.3 Plan de Pruebas

Para alcanzar los objetivos de la investigación en modelo, y sobre la base de la configuración geométrica entregada por el CGM, la EPN propuso el siguiente Plan de Pruebas para ser desarrollado en la Fase III de la investigación, el mismo que fue ejecutado luego de su aprobación. La descripción y el análisis de sus resultados es el objeto del presente informe técnico de Fase III: Estudio de la Alternativa Recomendada.

El Plan de pruebas definido conjuntamente está conformado por 3 grupos:

Grupo A, corresponde a una serie de pruebas ensayadas en el túnel de desvío y en la descarga intermedia, por separado. El objetivo principal de este primer grupo de pruebas es visualizar la calidad de flujo en la aproximación hacia el ingreso del túnel de desvío y en el vertedero de entrada al túnel de la descarga intermedia. Posteriormente se definirán las características del movimiento dentro

del cada túnel y el efecto de su geometría en planta y en perfil. Finalmente se busca identificar la uniformidad del flujo en la salida que definirá la eficiencia en la operación de las respectivas estructuras de disipación de energía y entrega de caudales al tramo del cauce natural.

Grupo B, corresponde a una serie de pruebas en el túnel de desvío y en la descarga intermedia, por separado. El objetivo principal de este segundo grupo de pruebas es analizar la calidad y uniformidad, rango de velocidades del flujo en el inicio de la estructura de disipación de energía

Grupo C, corresponde a una serie de pruebas simultáneas en el túnel de desvío y en la descarga intermedia. El objetivo principal de este tercer grupo de pruebas es analizar la calidad y uniformidad, eficiencia de las estructuras de disipación de energía y la calidad y características del flujo de entrega al cauce natural.

En el siguiente Cuadro No.7 se resume el Plan de Pruebas ejecutado en la Fase III de la investigación.

**Cuadro No.7:** Plan de Pruebas para el análisis de la disipación de energía en la zona de entrega del flujo al río Paute.

Fase III del estudio

PRUEBA No.	TÚNEL DE DESVÍO		DESCARGA INTERMEDIA		CAUDAL TOTAL		OBSERVACIONES
	Caudal Prototipo m <sup>3</sup> /s	Caudal Modelo l/s	Caudal Prototipo m <sup>3</sup> /s	Caudal Modelo l/s	Caudal Prototipo m <sup>3</sup> /s	Caudal Modelo l/s	
1	100	5,7			100	5,7	GRUPO A Se obtendrán: i) Velocidades medias a la salida del túnel de desvío y descarga intermedia.
2	200	11,3			200	11,3	
3	500	28,3			800	45,3	
4	800	45,3			500	28,3	
5	1130	63,9			1130	63,9	
6			25	1,4	25	1,4	
7			100	5,7	100	5,7	
8			150	8,5	150	8,5	
9			200	11,3	200	11,3	
10	100	5,7			100	5,7	GRUPO B Se obtendrán: i) Patrones de flujo a la salida de las conducciones. ii) Velocidades medias a la salida del túnel de desvío y descarga intermedia y de ser posible, en otras secciones transversales cerca del río y en el río.
11	200	11,3			200	11,3	
12	500	28,3			500	28,3	
13	800	45,3			800	45,3	
14	1130	63,9			1130	63,9	
15			25	1,4	25	1,4	
16			100	5,7	100	5,7	
17			150	8,5	150	8,5	
18			200	11,3	200	11,3	
19	100	5,7	25	1,4	125	7,1	GRUPO C Se obtendrán: i) En las pruebas con los caudales conjuntos se deben repetir las mediciones y observar la incidencia o interrelación entre los cuencos de sacavación.
20	200	11,3	100	5,7	300	17	
21	300	17,0	150	8,5	450	25,5	
22	800	45,3	200	11,3	1000	56,6	
23	1130	63,9	200	11,3	1330	75,2	

**Fuente:** Informe Fase III. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

#### **5.2.3.4 Antecedentes**

Luego del análisis experimental realizado en la Fase II de la investigación, en el que se realizaron pruebas con algunas modificaciones geométricas, se llegó a concluir que el dissipador tipo Kumin, no alcanzó el nivel de eficiencia en la disipación de energía, requerido en el proyecto. La calidad del flujo de salida presentó también algunas características desfavorables para la estabilidad de la plataforma de salida, del enrocado de protección y del cauce natural. Entre los factores más importantes que causan este comportamiento no admisible de la estructura propuesta en el diseño original, se identificaron a la distribución transversal no uniforme del flujo, la presencia de ondas cruzadas y la formación de una onda oblicua en la aproximación al dissipador.

Entre las recomendaciones propuestas en la Fase II, se incluyeron las siguientes modificaciones:

- ❖ Aumentar la curvatura en el trazado en planta del túnel.
- ❖ Aumentar la longitud del tramo recto de aproximación hacia la estructura de disipación de energía, tramo ubicado entre la segunda curva horizontal y la salida del túnel.
- ❖ Modificar la sección transversal del flujo a la salida del túnel, por medio de una transición a la sección tipo baúl.

#### **5.2.3.5 Análisis del funcionamiento de la Estructura de Disipación de energía y entrega de caudales del Túnel de desvío para la Fase III de la investigación**

En la serie de fotografías que se presenta a continuación, se observa que el flujo sufre un ensanchamiento desde la salida del túnel hasta la sección final de la plataforma de entrega. Las esquinas laterales próximas a la sección final del túnel no son ocupadas por el flujo, por lo que no resultan eficientes. En la parte final de la plataforma de entrega, en cambio, el ensanchamiento del chorro de

salida es superior al ancho de la plataforma, razón por la que se observa la formación de ondas en estos extremos laterales. La reflexión del flujo en los muros laterales no es simétrica, siendo mayor en el extremo final del muro izquierdo. Esto se debe a que la concentración del flujo hacia la margen izquierda en la salida del túnel se mantiene como resultado de las ondas cruzadas generadas por el cambio de alineación.

El flujo observado al final de la plataforma de entrega presenta velocidades suficientemente altas, capaces de arrastrar todo material suelto colocado en el cauce, como se observa en las fotografías No. 47 y 48. Los niveles de la superficie libre esperados en el río Paute no son suficientes para sumergir el resalto y reducir la capacidad erosiva del flujo de entrega.

**Fotografía No.47:** Representación del Río Paute con material suelto antes del funcionamiento del modelo.



**Fotografía No. 48:** Formación del cuenco en el tramo del río Paute, representado con material suelto, luego de la operación del dissipador. Geometría de Fase III.



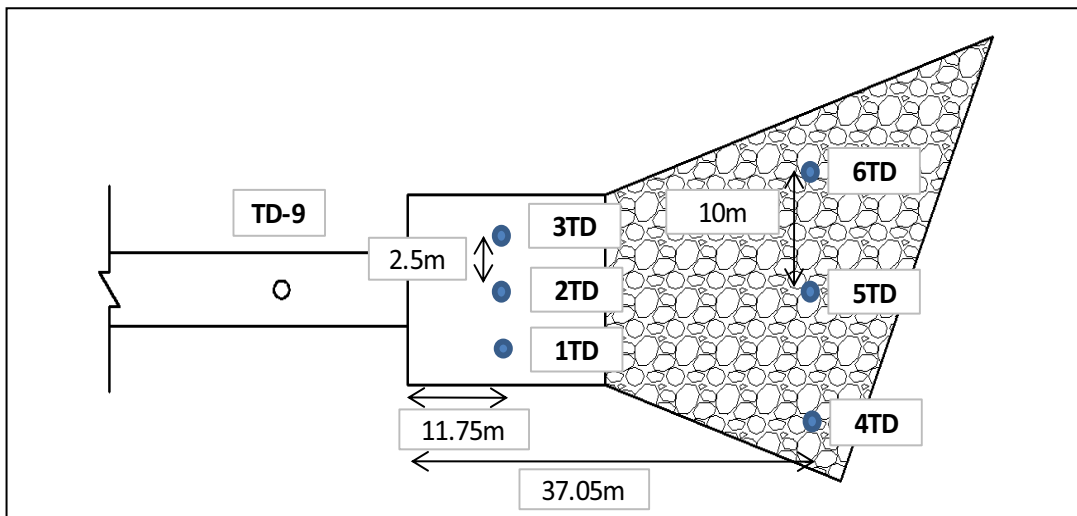
La capacidad de arrastre que se observa en el flujo sobre la margen izquierda del río y su cauce principal no es admisible. En consecuencia la EPN plantea una modificación adicional a la geometría de Fase III, que consiste en cambiar la alineación de los muros laterales de la Estructura de Entrega desde la salida del túnel hasta el ancho requerido para permitir el ensanchamiento gradual del chorro, sin provocar ondas en los muros laterales. En la figura No.24 se presenta la implantación de la geometría modificada para la Fase III.

#### **5.2.3.6 Mediciones de la velocidad en el flujo de salida para la geometría modificada de Fase III - Estructura de salida del Túnel de Desvío y del Túnel de la Descarga Intermedia.**

Para el análisis de la disipación de energía en la salida del túnel de desvío se parte de la velocidad media registrada en la sección final del túnel. Los puntos de medición de velocidades medias de flujo en el chorro de salida del túnel de desvío se ubican en 2 secciones transversales, la primera a 11.75 m de la boca de salida sobre la plataforma de entrega; y, la segunda, a 37.05 m desde la salida, sobre el enrocado de protección, mientras que para la descarga intermedia la primera

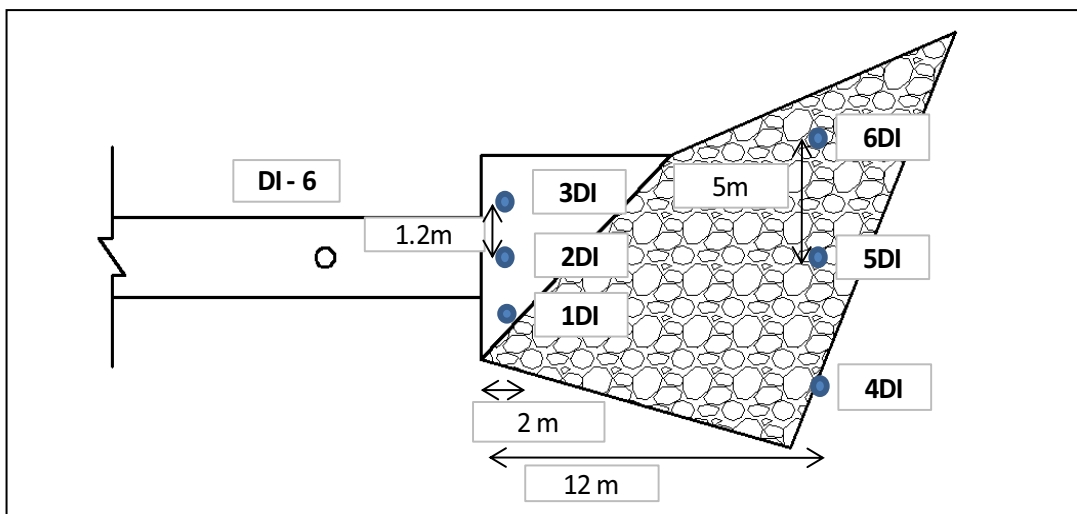
distancia esta a 2.00 m de la boca de salida sobre la plataforma de entrega; y, la segunda, a 12.00 m desde la salida. En cada sección transversal se definieron 3 puntos, como se presenta en el esquema de las figuras No. 19, 20. Las mediciones de velocidad en los puntos indicados permiten obtener información sobre la distribución de velocidades en planta para el chorro de salida así como la capacidad de arrastre del flujo de entrega.

**Figura No. 19:** Ubicación en planta de los puntos de medición de velocidad en la zona de entrega desde el Túnel de Desvío.



Elaborado: José Juma

**Figura No.20:** Ubicación en planta de los puntos de medición de velocidad en la zona de entrega desde la Descarga Intermedia.



Elaborado: José Juma

En cada uno de los puntos de medición se registró la velocidad puntual en la profundidad de flujo que permite definir la velocidad media en la vertical. El instrumento utilizado para la medición de velocidades puntuales fueron los Tubos Pitot – Prandtl, normalizados. La diferencia de carga de agua medida en el tubo es directamente el valor de la carga de velocidad  $v^2/2g$ .

Los datos obtenidos se muestran en el anexo 3 (F3-3C). Los resultados obtenidos en la medición de velocidades se muestran en los siguientes Cuadros:

**Cuadro No. 8:** Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde el Túnel de Desvío (valores para el modelo).

Túnel de desvío (valores modelo)												
PUNTO S	Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 5,70		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 11,30		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 28,30		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 63,90					
	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)				
TD-9	0,00	0,00	1,60	0,00	0,00	2,03	0,00	0,00	2,48	0,00	0,00	2,80
1TD	24,35	24,04	1,57	27,67	22,88	1,83	19,44	20,68	2,36	5,53	4,70	2,94
2TD	23,72		1,58	24,89		1,89	20,26		2,34	6,60		2,91
3TD	*		1,76	16,08		2,07	22,34		2,29	1,96		3,02
4TD	92,70	89,98	0,63	73,47	65,50	1,39	67,57	64,55	1,60	12,93	12,52	3,19
5TD	90,66		0,72	54,03		1,88	70,01		1,52	20,07		3,03
6TD	86,59		0,88	69,00		1,52	56,06		1,95	4,58		3,37

\*valores no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

**Elaborado: José Juma**

**Cuadro No.9:** Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde el Túnel de Desvío (valores para el prototipo).

Túnel de desvío (valores prototipo)												
PUNTOS	Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 101		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 200		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 500		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 1130					
	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)				
TD-9	0,00	0,00	11,34	0,00	0,00	14,37	0,00	0,00	17,51	0,00	0,00	19,77
1TD	24,35	24,04	11,12	27,67	22,88	12,91	19,44	20,68	16,69	5,53	4,70	20,78
2TD	23,72		11,21	24,89		13,34	20,26		16,56	6,60		20,60
3TD	*		12,41	16,08		14,62	22,34		16,21	1,96		21,36
4TD	92,70	89,98	4,43	73,47	65,50	9,85	67,57	64,55	11,34	12,93	12,52	22,56
5TD	90,66		5,10	54,03		13,27	70,01		10,74	20,07		21,45
6TD	86,59		6,22	69,00		10,74	56,06		13,81	4,58		23,80

\*valores no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

**Elaborado: José Juma**



**Cuadro No. 10:** Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde la Descarga Intermedia (valores para el modelo).

<b>Descarga Intermedia (valores Modelo)</b>												
PUNTOS	Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 1,42		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 5,65		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 8,48		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 11,30					
	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)				
DI-6	0,00	0,00	1,44	0,00	0,00	1,80	0,00	0,00	2,37	0,00	0,00	2,55
1DI	53,55	36,64	0,93	19,67	12,20	1,71	28,57	19,96	2,05	23,49	16,49	2,27
2DI	31,66		1,30	4,73		1,92	11,36		2,35	9,50		2,52
3DI	24,72		1,39	*		1,89	0,00		2,53	*		2,64
4DI	*		52,81	73,57		1,49	58,61		1,74	85,18		0,93
5DI	*	*	2,03		25,10	2,35	*	84,60	1,92			
6DI	*	94,33	0,34		25,36	2,35	84,03	0,99				

\*valores no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

**Elaborado: José Juma**

**Cuadro No. 11:** Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde la Descarga Intermedia (para el prototipo).

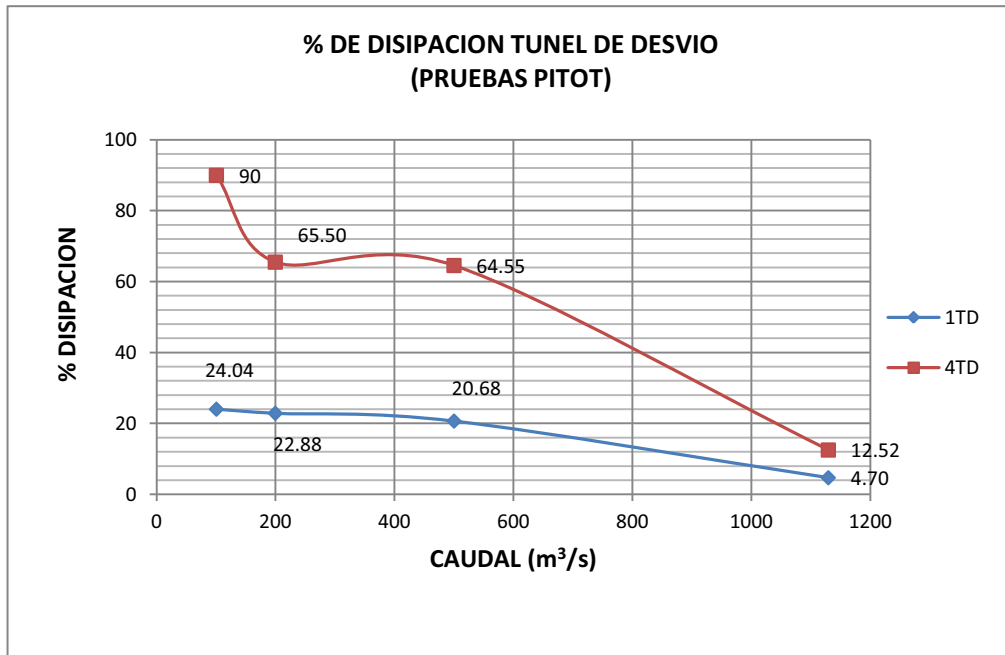
<b>Descarga Intermedia (valores prototipo)</b>												
PUNTO	Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 25		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 100		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 150		Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 200					
	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)	%Disipación	Velocidad (m/s)				
DI-6	0,00	0,00	10,17	0,00	0,00	12,76	0,00	0,00	16,76	0,00	0,00	18,02
1DI	53,55	36,64	6,61	19,67	12,20	12,09	28,57	19,96	14,52	23,49	16,49	16,06
2DI	31,66		9,16	4,73		13,56	11,36		16,60	9,50		17,81
3DI	24,72		9,83	*		13,34	0,00		17,86	*		18,66
4DI	*		52,81	73,57		10,53	58,61		12,27	85,18		6,61
5DI	*	*	14,35		25,10	36,36	16,63	*	84,60	13,56		
6DI	*	94,33	2,43		25,36	16,60	84,03	6,97				

\*valores no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

**Elaborado: José Juma**

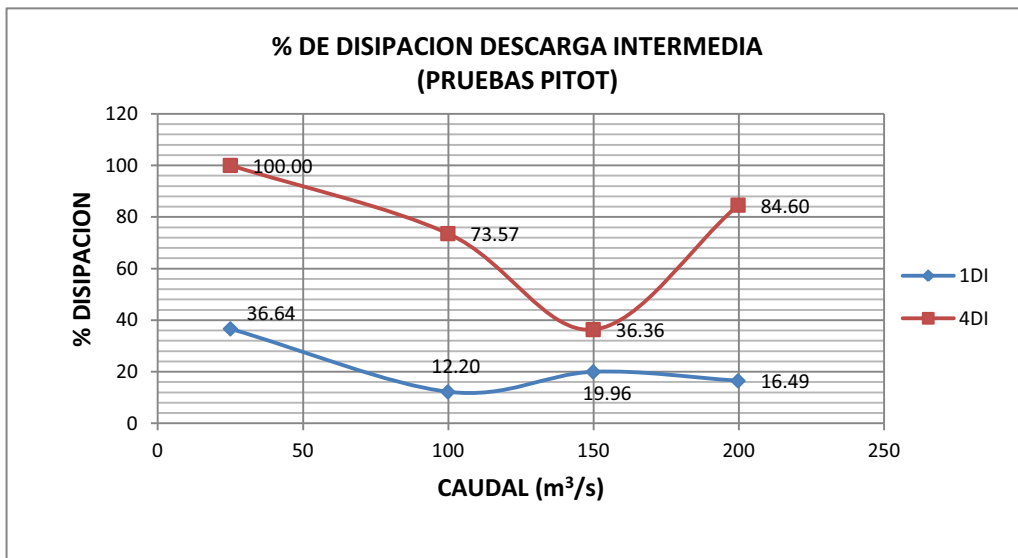
La variación del porcentaje de disipación de energía respecto del caudal, tanto en el caso del Túnel de Desvío como en el de la Descarga Intermedia, se puede observar en las siguientes Figuras Nos. 21 y 22:

**Figura No.21:** Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega desde el Túnel de Desvío.



Elaborado: José Juma

**Figura No.22:** Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega desde la Descarga Intermedia.



Elaborado: José Juma

En las siguientes fotografías y en el anexo 2 (F3-2C) se puede observar el comportamiento del flujo a la salida de los dos túneles, así como las

características del movimiento del agua en la geometría propuesta, con el cambio brusco de sección, en las siguientes Fotografías:

### PARA LA ZONA DE DESCARGA DESDE EL TÚNEL DE DESVÍO

**Fotografía No.49:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en el Túnel de Desvío ( $Q= 100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 50:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en el Túnel de Desvío ( $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 51:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en el Túnel de Desvío ( $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 52:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en el Túnel de Desvío ( $Q = 1130 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## PARA LA ENTREGA DESDE LA DESCARGA INTERMEDIA

**Fotografía No. 53:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en la Descarga Intermedia ( $Q = 25 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 54:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en la Descarga Intermedia ( $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 55:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en la Descarga Intermedia ( $Q_{di}=150 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 56:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en la Descarga Intermedia ( $Q_{di}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



### **5.2.3.7 Análisis del funcionamiento hidráulico de la geometría de las Estructuras de Disipación de Energía y Entrega, definida para la Fase III**

- ❖ En base a las observaciones y a los resultados obtenidos en las pruebas con la geometría propuesta para la Fase III, se observa un mejor funcionamiento en las estructuras de salida de los túneles de desvío y descarga intermedia, debido a que la distribución del flujo en la sección transversal, en la salida también se ha mejorado (distribución transversal de la profundidad de flujo y de la velocidad) por el cambio en la geometría de los tramos finales de los túneles.
- ❖ La sección transversal tipo baúl para las dos estructuras, túnel de desvío y descarga intermedia, funciona de mejor forma que la sección circular.
- ❖ En el túnel de desvío la ampliación brusca de la sección transversal en la salida, no trabaja en forma eficiente. Se da lugar a la presencia de zonas muertas, ubicadas en las esquinas de la plataforma, junto a la sección transversal de salida de los túneles. Adicionalmente, en la pared de la margen izquierda de la estructura de salida del túnel de desvío existe un choque del flujo, que produce una apreciable sobre-elevación del nivel del agua.
- ❖ Debido a que el flujo se mantiene con suficiente energía en su recorrido, sobre el enrocado aguas abajo de la plataforma de salida del túnel de desvío, se observa que las piedras son removidas en su totalidad para caudales mayores a 500 m<sup>3</sup>/s.
- ❖ En cuanto a la disipación de energía se puede observar en el Cuadro No.18 que, para caudales altos en la salida del túnel de desvío, se alcanzan eficiencias que varían de 12% al 65%. Las velocidades en el flujo de salida mantienen el orden de magnitud de las velocidades en el interior del túnel; por lo que el enrocado previsto en la estructura de salida no es suficiente para asegurar la estabilidad de la margen y cauce natural. El nivel de la superficie libre en el río no es suficiente para controlar el flujo

con alta energía cinética. Los rangos de velocidades del flujo de entrega al cauce natural son altos, de tal manera que no es posible garantizar su estabilidad con tamaños manejables de los materiales de protección o enrocado.

La geometría de la estructura de disipación de energía y entrega de caudales del túnel de Descarga Intermedia es similar a la del Túnel de Desvío, con un dimensionamiento menor. El rango de operación es mucho menor, pues el máximo caudal esperado es 200 m<sup>3</sup>/s. La expansión brusca, de igual manera no trabaja eficientemente, quedando zonas muertas junto a la sección de salida.

- ❖ En la estructura de salida del túnel de descarga intermedia el porcentaje de disipación de energía es aceptable para su operación con caudales bajos, menores a 100 m<sup>3</sup>/s. Los valores de registrados varían entre el 36% y el 84%. Mientras se incrementa el caudal, este porcentaje disminuye, no se genera el resalto hidráulico a la salida del flujo desde el túnel y se no produce un arrastre intenso en el enrocado al final de la estructura de salida.
- ❖ Las características del flujo en la zona de entrega al cauce del río Paute para la Descarga Intermedia son satisfactorias y se las mantendrá como parte de la geometría recomendada para el diseño definitivo.

Se recomienda mantener la geometría planteada para la estructura de salida del túnel de la Descarga Intermedia, debido a que el rango de caudales de operación es relativamente bajo y puede ser controlado con los niveles del río.

Par la estructura de salida del túnel de desvío, en cambio se recomienda: (i) cambiar la ampliación brusca de la sección en la plataforma por una ampliación gradual de las paredes; (ii) cambio en la alineación y en la ubicación de la pared de la margen izquierda del flujo; y (iii) la construcción de un enrocado con un mayor diámetro representativo del material para evitar su arrastre.



## 5.2.4 MODIFICACIONES A LA GEOMETRÍA PROPUESTA EN LA FASE III PARA LA ESTRUCTURA DE SALIDA DEL TUNEL DE DESVÍO (MDE-3)

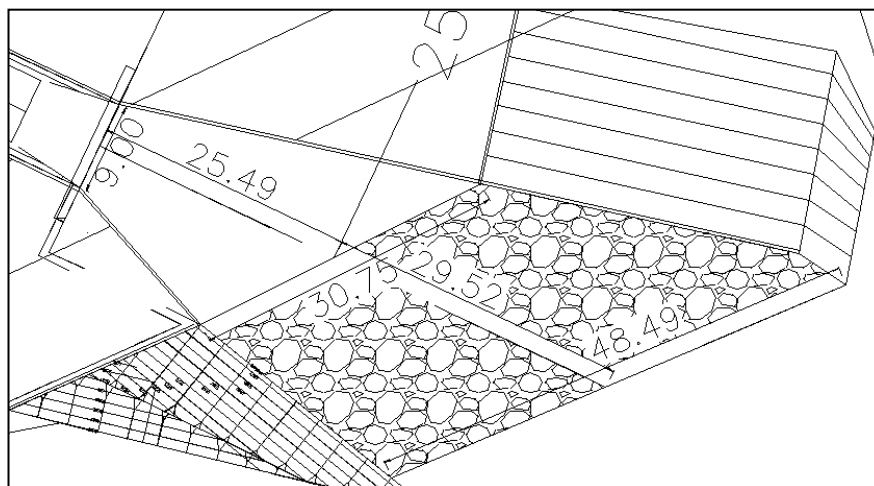
### 5.2.4.1 Descripción de la geometría propuesta para la Optimización de la Geometría de la Estructura de Salida del Túnel de Desvío

Las modificaciones en la geometría, propuestas para el prototipo se indican en el Plano No.F3-DEF-P5, para el modelo en el plano No. F3-DEF-M3 en el anexo 1 (Planos) y en el esquema de la Figura No.23.

Los cambios geométricos se resumen a continuación:

A la salida del túnel de desvío se conformará la plataforma delimitada por muros laterales rectos que se implantan desde la sección final del túnel con inclinaciones diferentes hacia la izquierda y derecha del eje, con una inclinación de  $11^\circ$  y  $23^\circ$  respectivamente. Los muros laterales tienen una altura  $H=12$  m. La longitud de la plataforma medida sobre el eje del túnel de desvío es de  $L= 25.49$  m, con su inicio en la abscisa  $1+252.39$  y su terminación en la abscisa  $1+276.95$ .

**Figura No. 23:** Vista en planta de la modificación para optimización.



**Fuente:** Informe Fase III. Modelo Hidráulico del Túnel de desvío de la central Paute Molino

A continuación de esta plataforma se ha dispuesto un enrocado de protección con una longitud en el eje de 29.52 m. En la siguiente fotografía se muestra las características geométricas y constructivas de la estructura de salida del túnel de desvío, construida en el modelo reducido, con las modificaciones propuestas.

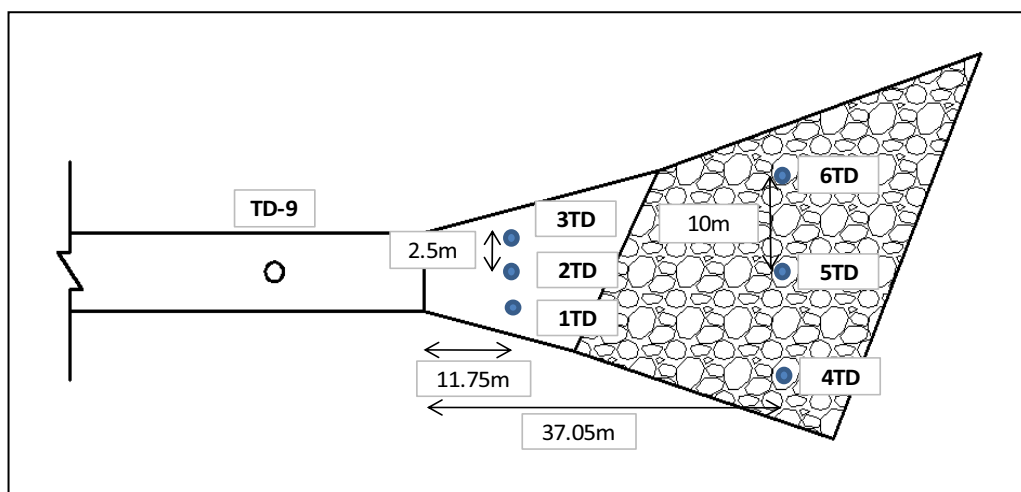
**Fotografía No.57:** Vista en planta de la geometría propuesta para el diseño definitivo de la zona de entrega desde el Túnel de Desvío.



#### 5.2.4.2 Análisis del funcionamiento de la estructura de disipación de energía y entrega de caudales del túnel de desvío con la geometría modificada.

Para evaluar el comportamiento hidráulico de las modificaciones geométricas en la estructura de salida del túnel de desvío se realizaron mediciones de velocidad en los puntos ubicados en planta que se detalla en el esquema siguiente:

**Figura No. 24:** Ubicación en planta de los puntos de medición de velocidad para la zona de descarga desde el Túnel de Desvío. Modificación MDE-3.



Elaborado: José Juma

Luego de realizadas las pruebas respectivas, mostradas en el anexo 3 (F3-3C), los valores de la velocidad se muestran en los siguientes Cuadros Nos. 12 y 13:

**Cuadro No. 12:** Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde el Túnel de Desvío (para el modelo).

Túnel de desvío (Valores modelo)									
PUNTOS	Caudal (l/s)= 28,30			Caudal (l/s)= 45,30			Caudal (l/s)= 56,60		
	%Disipación		Velocidad (m/s)	%Disipación		Velocidad (m/s)	%Disipación		Velocidad (m/s)
TD-9	0,00	0,00	2,55	0,00	0,00	2,75	0,00	0,00	2,85
1TD	20,23	16,84	2,50	12,23	11,70	2,88	13,43	11,03	2,95
2TD	13,44		2,65	10,86		2,91	8,72		3,05
3TD	*		2,73	12,00		2,88	10,93		3,00
4TD	68,37	44,09	1,76	53,12	45,01	2,33	54,05	27,16	2,39
5TD	30,81		2,71	13,83		3,24	14,24		3,34
6TD	33,08		2,66	68,08		1,87	13,17		3,36

\*valores no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

**Elaborado: José Juma**

**Cuadro No. 13:** Valores de la Velocidad y Porcentaje de Disipación en los diferentes puntos de medida, a la salida desde el Túnel de Desvío (para el prototipo).

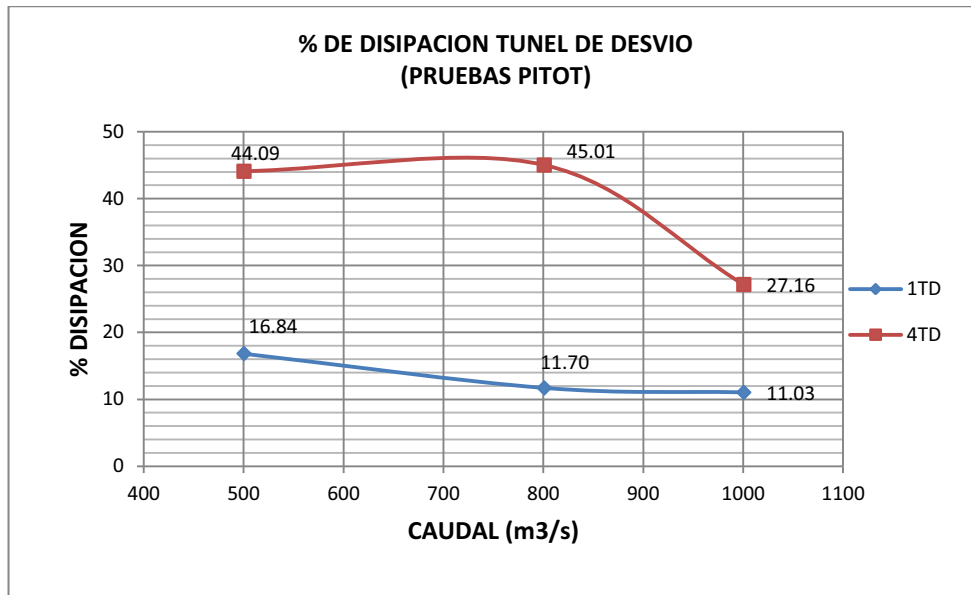
Túnel de desvío (Valores prototipo)									
PUNTOS	Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 500			Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 801			Caudal (m <sup>3</sup> /s)= 1001		
	%Disipación		Velocidad (m/s)	%Disipación		Velocidad (m/s)	%Disipación		Velocidad (m/s)
TD-9	0,00	0,00	18,06	0,00	0,00	19,47	0,00	0,00	20,18
1TD	20,23	16,84	17,68	12,23	11,70	20,35	13,43	11,03	20,83
2TD	13,44		18,73	10,86		20,56	8,72		21,60
3TD	*		19,27	12,00		20,38	10,93		21,24
4TD	68,37	44,09	12,43	53,12	45,01	16,45	54,05	27,16	16,87
5TD	30,81		19,13	13,83		22,88	14,24		23,63
6TD	33,08		18,79	68,08		13,21	13,17		23,78

\*valores no considerados calados con ingreso de aire en enrocado

**Elaborado: José Juma**

La variación del porcentaje de disipación de energía respecto al caudal, en el Túnel de Desvío, se puede observar en la siguiente Figura No. 25:

**Figura No. 25:** Curva de tendencia de la eficiencia en el proceso de disipación de energía en función del caudal para la entrega desde el Túnel de Desvío.



**Elaborado: José Juma**

En el anexo 3 (F3-3C) y en las siguientes Fotografías Nos. 58, 59 y 60 se observa el comportamiento del flujo a la salida de los dos túneles, el funcionamiento de la geometría propuesta para optimización con el cambio gradual de sección en el Túnel de Desvío y la geometría adoptada para la zona de entrega en la Descarga Intermedia:

**Fotografía No. 58:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en el Túnel de Desvío ( $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Modificación MDE-3.



**Fotografía No.59:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en el Túnel de Desvío ( $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Modificación MDE-3.



**Fotografía No. 60:** Vista en planta del funcionamiento de la estructura de salida en el Túnel de Desvío ( $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Modificación MDE-3.



### 5.2.4.3 Conclusiones

El funcionamiento con la geometría recomendada para la disipación de energía presenta mayor eficiencia que la registrada con la geometría definida para la Fase

III. En el cuadro No.14 se muestra la variación de porcentaje de disipación de energía para las dos geometrías analizadas para la Fase III.

**Cuadro No. 14:** Valores de Porcentaje de Disipación a la salida desde el Túnel de Desvío sobre el enrocado (para el prototipo).

Modificación	Caudal m <sup>3</sup> /s	
	500	1000
Diseño inicial Fase III	4,70%	12,52%
Diseño modificado	11,03%	27,16%

**Elaborado: José Juma**

- ❖ Debido a que el flujo mantiene una alta energía cinética en su recorrido sobre el enrocado, aguas abajo de la plataforma de salida del túnel de desvío, se observa que el material suelto dispuesto en el modelo es removido en su totalidad para caudales mayores a 500 m<sup>3</sup>/s.
- ❖ Los niveles de disipación de energía alcanzados para el rango de caudales bajos, menores a 500 m<sup>3</sup>/s, es aceptable. Los porcentajes registrados varían entre el 11% hasta el 16%, antes del enrocado; y, entre el 27% al 44%, sobre el enrocado. Sin embargo, los niveles alcanzados de disipación de energía no son suficientes para garantizar la estabilidad del enrocado de protección y del cauce natural. Se observa un alto poder de arrastre en el flujo de entrega que podría afectar el tramo que recibe el flujo de salida desde los túneles de desvío y de descarga intermedia.
- ❖ En base a las observaciones y al análisis de los resultados obtenidos en las pruebas con la geometría propuesta para el diseño optimizado, se puede concluir que la plataforma trabaja de una manera aceptable para caudales bajos y hasta medios. La alineación inclinada de las paredes laterales de la estructura de salida eliminan las zonas muertas del flujo y reflexiones de ondas en las paredes laterales.
- ❖ Con la variación gradual del ancho en la plataforma de descarga desde el Túnel de Desvío, en la margen izquierda, se elimina el choque del flujo y se

disminuye totalmente la sobre-elevación de la superficie libre del agua en esta zona.

- ❖ Para los caudales altos existe un alto riesgo de socavación en el cauce mismo del río Paute.

#### **5.2.4.4 Recomendaciones**

La geometría optimizada logró disipar una mayor cantidad de energía por lo que se recomienda utilizarla para la estructura de salida del túnel de desvío. Sin embargo, debido a la alta energía cinética residual del flujo de entrega al río Paute se recomienda la revisión del diseño del enrocado previsto, o analizar otras alternativas de disipación de energía que puedan cumplir con las exigencias de flujo para garantizar una correcta entrega sobre el cauce del río Paute.

## **CAPITULO 6**

### **ANALISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS**

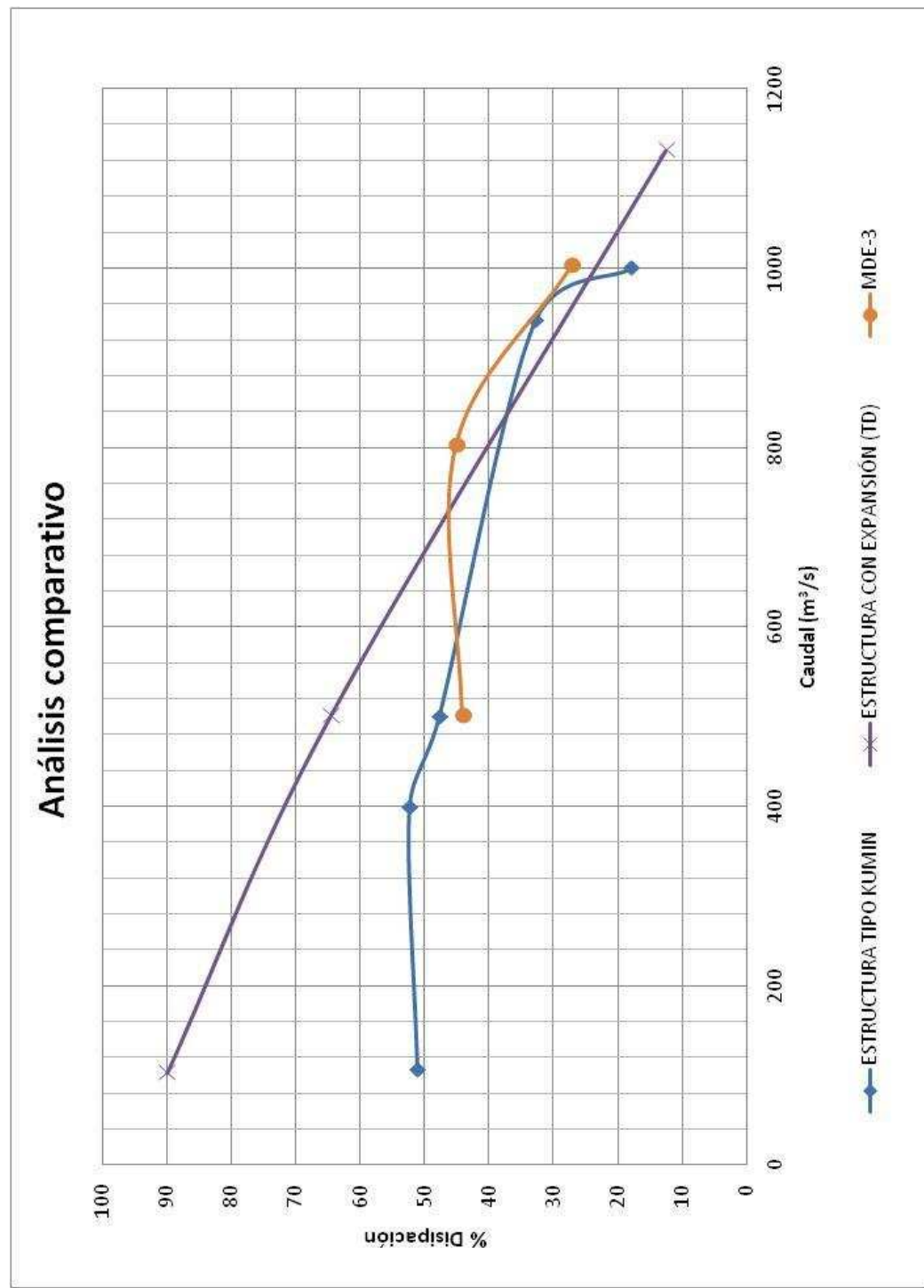
A lo largo de toda la modelación física se obtuvieron resultados cuantitativos como cualitativos, únicamente para resolver el problema de disipación de energía en restitución al río Paute, tratando de mejorar el funcionamiento con modificaciones para aumentar el rendimiento de cada estructura, así en la figura No. 26 se muestra una comparación entre la estructura normalizada tipo Kumin y la estructura con expansión únicamente del túnel de desvío, se observa que el porcentaje de disipación es mayor para la estructura con expansión brusca, alcanzando valores de hasta 90% para caudales pequeños, mientras que para caudales grandes llega a valores de hasta 12.52%, lo cual no es recomendable el uso de esta estructura, con la MDE-3, expansión gradual, se logro mejorar el flujo de salida junto con la disipación, pero los valores no están dentro de lo admisible para una eficiencia optima de una estructura de disipación.

La disipación de energía para la estructura normalizada tipo Kumin se observa una tendencia de disminución de eficiencia cuando el caudal aumenta, sin embargo es una estructura que funciona para espacios pequeños.

En el cuadro No.15 se presenta las observaciones y funcionamiento de las modificaciones en el modelo.



Figura No. 26: Curvas comparativas de disipación de energía.



Elaborado: José Juma

**Cuadro No. 15:** Cuadro comparativo entre modificaciones, resumiendo los resultados obtenidos en cada modificación.

Modificación		Distribución en planta del flujo	Eficiencia en la disipación de energía(n)	Calidad del flujo de salida
MDE-1	Sin control de aguas abajo	Concentrado hacia la pared lateral izquierda	Baja $10% < n < 30%$	No aceptable
	Con control de aguas abajo	Menor concentración hacia la pared lateral izquierda	Baja $20% < n < 50%$	Aceptable para caudales menores a $500 \text{ m}^3/\text{s}$ y niveles medios de 3.62m a 6.03m de sumergencia
MDE-2	Sin control de aguas abajo	Menor concentración hacia la pared lateral izquierda	Baja $20% < n < 60%$	No aceptable
	Con control de aguas abajo	Presentación de ondas en la pared lateral izquierda	Baja para caudales altos $10% < n < 30%$	Aceptable para caudales menores a $200 \text{ m}^3/\text{s}$ y niveles máximos de 6.03m de sumergencia
MDE-3	Sin control de aguas abajo	Flujo de salida homogéneo	Baja $25% < n < 45%$	Aceptable para caudales altos, alto riesgo de socavación para caudales mayores a $500 \text{ m}^3/\text{s}$

Elaborado: José Juma

## **CAPITULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **7.1 CONCLUSIONES**

##### **7.1.1 DISIPADOR TIPO KUMIN**

- Para la Fase I, la estructura de salida, antes de la descarga al disipador de energía, la sección transversal circular resulta insuficiente para los caudales máximos como consecuencia de la presencia de la estructura tipo Kumin.
- Para los caudales mencionados  $Q \leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$ , provenientes de la operación única de la Descarga Intermedia, el funcionamiento del disipador de energía es medianamente satisfactorio.
- Se menciona en la literatura técnica que este tipo de estructura es recomendable para el rango  $2,5 < Fr < 10$ ; en el presente caso, con valores de Fr entre 2 y 3.5 su eficiencia no es adecuada. Las velocidades de flujo a la salida del disipador superan los valores admisibles para garantizar la estabilidad del enrocado de protección así como de las márgenes y cauce natural del río Paute.
- Variando la geometría del disipador (MDE-1), de tal forma que se aumente la altura de impacto o de choque en la estructura se mejora el porcentaje de disipación de energía a la salida, pero se obstruye la sección del túnel, para los caudales mayores a  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se presenta un efecto de embalsamiento con la consecuente pérdida de capacidad hidráulica del tramo final del túnel. En todo caso, la calidad del flujo de salida de la estructura de disipación de energía no garantiza la estabilidad del zampeado, ni del enrocado, ni del cauce principal del río en el tramo de

descarga debido a la presencia de chorros de alta velocidad que impactan en las diferentes zonas de la estructura y del río.

- Una estructura de disipación por impacto, del tipo Kumin, resulta poco efectiva para las características hidrodinámicas del flujo similares a la que se presentan a la salida del túnel de desvío (falta de uniformidad en la profundidad de agua a lo largo de la sección transversal).

### **7.1.2 ESTRUCTURA DE CANAL CON EXPANSIÓN**

- Para la modificación en la FASE II (MDE-2) se presenta un aumento importante en el porcentaje de disipación de energía, en particular, sin embargo la disipación de energía resulta ser muy baja para una buena eficiencia, la presencia del colchón de agua disminuye el efecto de las altas velocidades y disminuye notablemente la presencia de socavación intensa en la zona de entrega al río.
- La calidad del flujo de salida no garantiza la estabilidad del enrocado ya que produce grandes zonas de socavación en el punto de restitución al río, debido a los chorros con altas velocidades.
- Para la Fase III, se mejoro el flujo de salida independizando cada entrega, Descarga intermedia y Túnel de Desvío, se observa un mejor funcionamiento en las estructuras de salida, debido a que la distribución del flujo en la sección transversal, en la salida también se ha mejorado (distribución transversal de la profundidad de flujo y de la velocidad) por el cambio en la geometría de los tramos finales de los túneles.
- La descarga intermedia en esta Fase posee una eficiencia que varía desde 12% al 65%, esto no garantiza una correcta entrega al cauce del río Paute,

para caudales altos las velocidades originan un movimiento de del enrocado en el punto de restitución al río Paute, por lo que no se asegura la estabilidad de la margen y cauce natural.

Respecto a la estructura de disipación de energía del túnel de Descarga Intermedia, similar a la del Túnel de Desvío, con un dimensionamiento menor, el rango de operación es mucho menor, pues el máximo caudal esperado es 200 m<sup>3</sup>/s. La expansión brusca, de igual manera no trabaja eficientemente, quedando zonas muertas junto a la sección de salida.

- En la modificación de la fase III (MDE-3), el funcionamiento con la geometría recomendada para la disipación de energía presenta mayor eficiencia con respecto a la propuesta inicial en esta Fase aumentando, sin embargo esta ampliación no genera una suficiente eficiencia que garantice el correcto funcionamiento de la estructura de disipación.

### 7.1.3 CONCLUSIONES EN FASES

- De acuerdo con lo visto en las pruebas con FASE I la estructura de disipación no resulto ser muy eficiente para el tipo de flujo combinado del túnel de desvío y de la descarga intermedio el flujo era muy inestable no es recomendable esta estructura para el proyecto.
- Para la Fase II se logro optimizar la disipación con la optimización del Kumin pero no ofrecía un rango correcto de disipación para no causar transporte de material en el tramo final del túnel.
- En la Fase III la utilización de una estructura de disipación se reemplazo por el cambio de geometría del túnel y separar las conducciones, esto mejoró el porcentaje de disipación sin embargo los valores no son aun efectivos para garantizar el buen funcionamiento de la estructura al final del túnel de desvío.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- De acuerdo con lo observado en las fases del modelo, con las propuestas de optimización en el punto de entrega al río paute, generan mayor eficiencia de energía disipada, pese a esto, el rango de porcentaje de energía disipada tiene que estar sobre el 60% para garantizar el buen funcionamiento, por lo que es necesario incluir un estudio con estructuras que puedan satisfacer esta condición.
- Analizar la posibilidad de ubicar una estructura de disipación de energía en el tramo final del túnel de desvío, que sea adecuada para el rango de valores de los números adimensionales de Froude obtenidos en el flujo de salida del túnel.
- La geometría final optimizada logró disipar una mayor cantidad de energía por lo que se recomienda utilizarla para la estructura de salida del túnel de desvío. Sin embargo, debido a la alta energía cinética residual del flujo de entrega al río Paute se recomienda la revisión del diseño del enrocado previsto.
- Es necesario analizar otros tipos de estructuras que cumplan con una correcta disipación de energía como:
  - Salto en esquí.- es recomendable ya que se tiene la longitud necesaria para el desarrollo del salto.
  - Cubeta tipo IV Bureau.- es recomendable para Froude (Fr) bajos.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Luis Castillo, DISIPADORES DE ENERGIA, Universidad Politécnica de Cataluña E.T.S. de Ingenieros de caminos y canales y puertos. Departamento de Ingeniería Hidráulica Marítima y Ambiental sección de Hidráulica e Hidrología, Barcelona 1987.
- Edward A. Elevatorski, 1952, HYDRAULIC ENERGY DISIPATORS
- A.A.Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1995, ENERGY DISSIPATORS
- Bureau of Reclamation, DESIGN OF SMALL CANAL STRUCTURES, Denver – Colorado, 1978
- Publicación N°. FHWA-NHI-06-086, HYDRAULIC DESING OF ENERGY DISSIPATORS FOR CULVERTS AND CHANNELS, Hydraulic Engeneering Circular N° 14, Third Edition 2006.
- Arturo Rocha Felices: LOS MODELOS COMO HERRAMIENTA VALIOSA PARA EL DISEÑO HIDRAULICO, Febrero 2003.
- Escuela Politécnica Nacional, UCE, Fundacyty, ANÁLISIS DEL FLUJO EN ESTRUCTURAS PARA CAMBIOS DE NIVEL Y DIRECCION EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO DE CIUDADES ANDINAS, Proyecto PIC-CEREPS-072.
- Odgaard, A.J.: Fuid Properties and Their Scale Effects in Froude-scaled Hydraulic Models, Symposium on Scale Effects in modeling Hydraulic Structures, Technische Akademie Esslingen, Alemania, 1984.
- Vente Chow, HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS.

- J. Peterka, HIDRAULIC DESIGN OF STILLING BASINS AND ENERGY DISSIPATORS.
- Resalto Hidráulico como disipación de energía.  
[www.dispatorenergi//resaltohidraulico//rev](http://www.dispatorenergi//resaltohidraulico//rev).



## **ANEXOS**

**ANEXOS 1**  
**PLANOS PROTOTIPO Y MODELO**

**FASE 1**  
**PLANOS PROTOTIPO Y MODELO**

**FASE 2**  
**PLANOS PROTOTIPO Y MODELO**

**FASE 3**  
**PLANOS PROTOTIPO Y MODELO**

**ANEXOS 2**  
**REGISTRO FOTOGRÁFICO**

**ANEXOS F1-2A**  
**DISIPADOR DE ENERGÍA**  
**TIPO KUMIN**

**Fotografía No. 1** Vista de planta del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado  $Q_{TD} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 2** Vista lateral del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado de  $Q_{TD} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$





**Fotografía No. 3** Vista de planta del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado de  $Q_{TD} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 4** Vista lateral del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado de  $Q_{TD} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 5** Vista de planta del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de  $Q_{TD} = 940,5 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 6** Vista lateral del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de  $Q_{TD} = 940,5 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 7** Vista de planta del funcionamiento del disipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado de  $Q_{D1} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 8** Vista de planta del funcionamiento del disipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado de  $Q_{D1} = 100 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 9** Vista de planta del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado de  $Q_{D1} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 10** Vista lateral del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal aproximado de  $Q_{D1} = 200 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 11** Vista de planta del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de  $224,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{TD} = 199,8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 24,7 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 12** Vista lateral del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de  $224,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{TD} = 199,8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 24,7 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 13** Vista de planta del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de  $397,8 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{TD} = 198,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 199,8 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 14** Vista lateral del flujo de salida del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de  $397,8 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{TD} = 198,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 199,8 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 15** Vista de planta del funcionamiento del dissipador de energía tipo Kumin con un caudal de  $998,8 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q_{TD} = 898,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q_{DI} = 100,8 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 16** Inclinación del resalto a la entrada de la estructura de salida



**Fotografía No. 17** Tramo del río Paute a la salida del túnel de desvío y dissipador de energía tipo Kumin.



**Fotografía No. 18** Vista frontal del flujo de salida del dissipador tipo Kumin hacia el tramo del río Paute con un caudal aproximado de  $900 \text{ m}^3/\text{s}$





**Fotografía No. 19** Modificación de la distribución del material suelto en el cauce del río luego de la operación del dissipador con el caudal aproximado de  $900 \text{ m}^3/\text{s}$ .



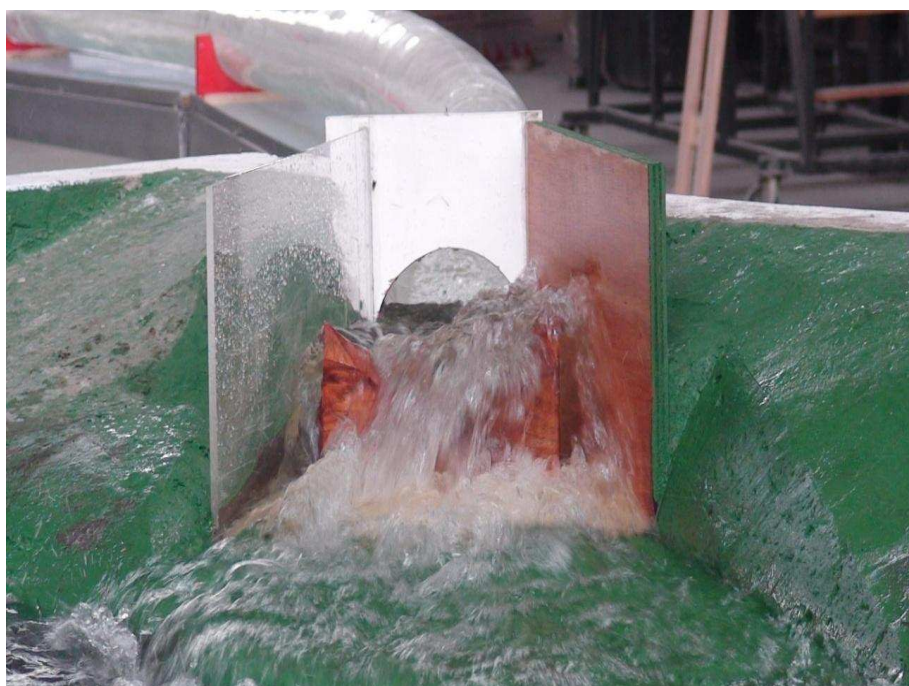
**ANEXOS F2-2B**  
**DISIPADOR DE ENERGÍA**  
**TIPO KUMIN Y**  
**EXTRUCTURA CON EXPANSIÓN**

**FOTOGRAFIAS DE LA GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA CON LA MODIFICACIÓN MED-1**

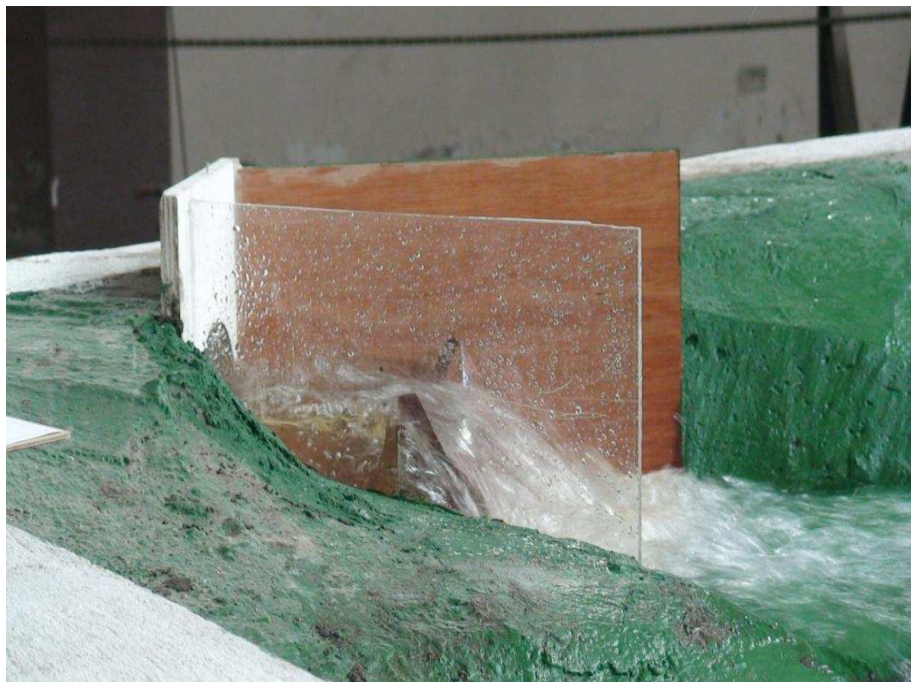
**Fotografía No.20:** Vista en Planta de la modificación en la geometría de estructura de salida denominada MDE-1



**Fotografía No.21** Vista de Frente de la modificación en la geometría de estructura de salida denominada MDE-1



**Fotografía No.22:** Vista de Perfil de la modificación en la geometría de estructura de salida denominada MDE-1



**Fotografía No.23:** Detalle de la inclusión de un dissipador Tipo Kumin, de tamaño aumentado.



**FOTOGRAFIAS DE LA GEOMETRIA DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA CON LA MODIFICACIÓN MDE-2**

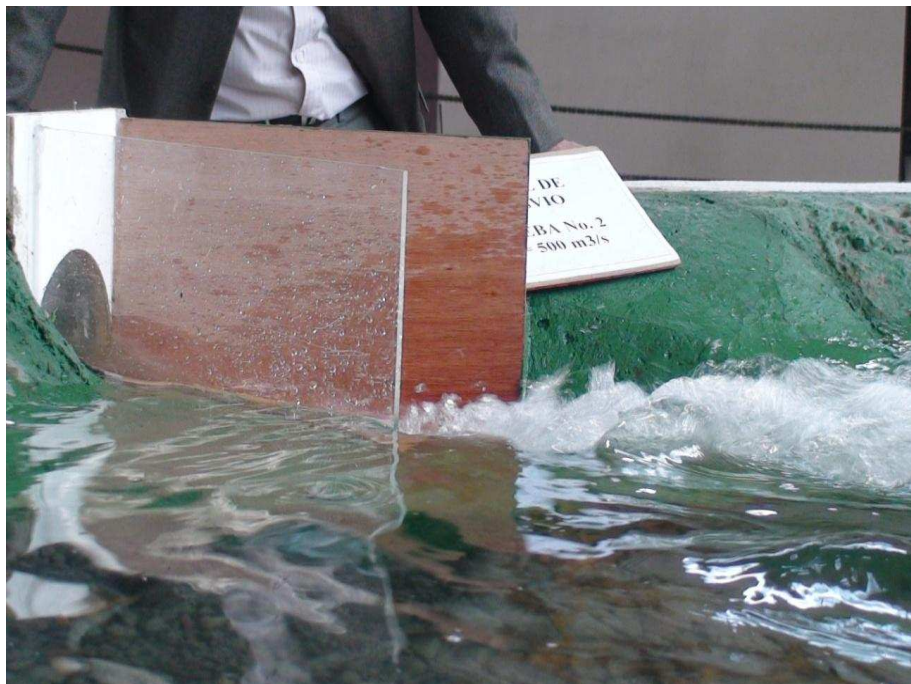
**Fotografía No.24:** Vista en Planta de la modificación en la geometría de estructura de salida denominada MDE-2.



**Fotografía No.25:** Vista Frontal de la modificación en la geometría de estructura de salida denominada MDE-2.



**Fotografía No.26:** Vista de Perfil de la modificación en la geometría de estructura de salida denominada MDE-2.

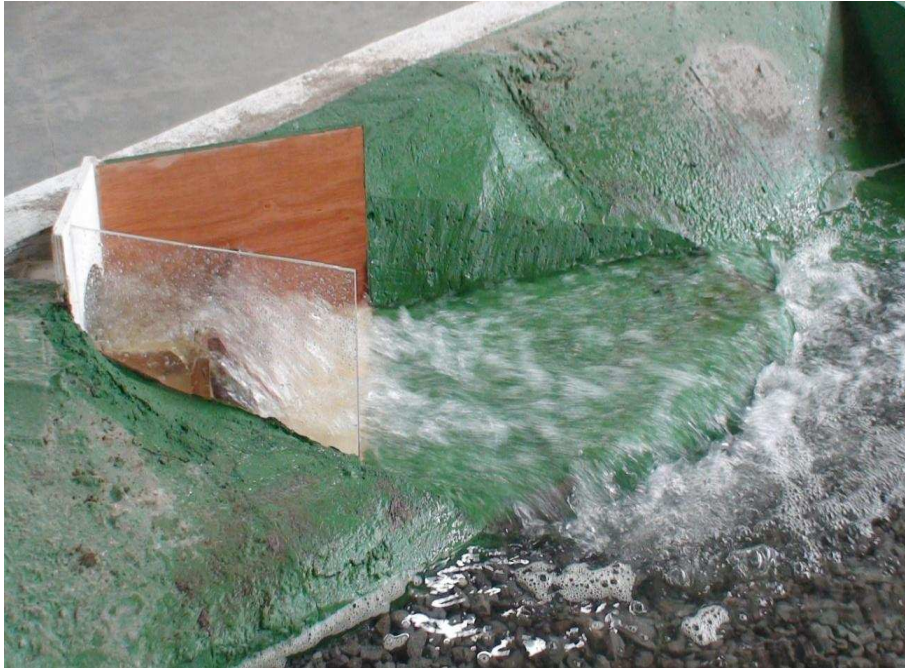


#### FOTOGRAFIAS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE SALIDA

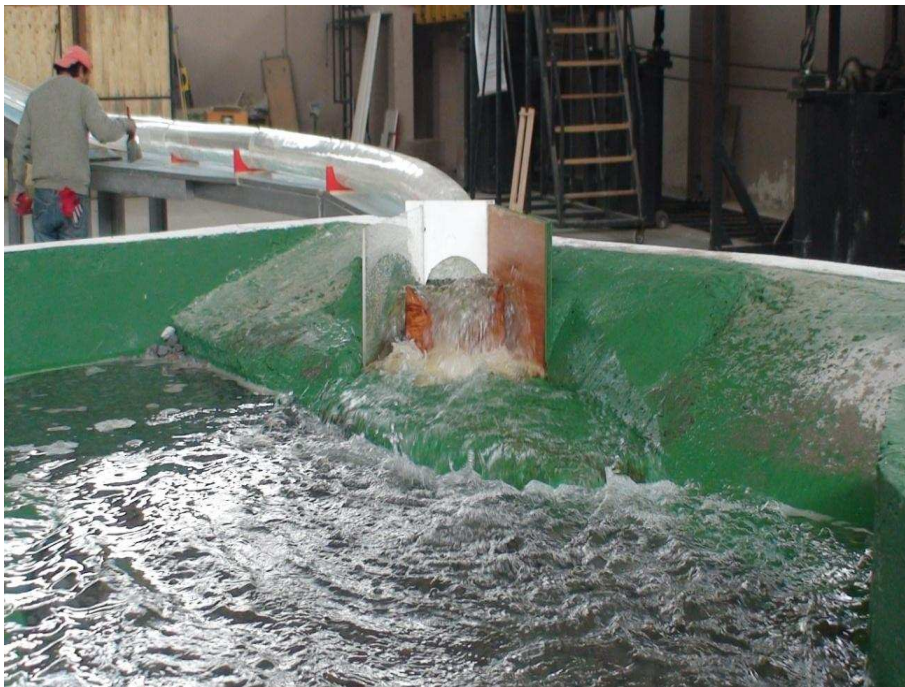
**Fotografía No. 27:** Vista en Planta del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-1,  $Q_{\text{aprox}}=500 \text{ m}^3/\text{s}$



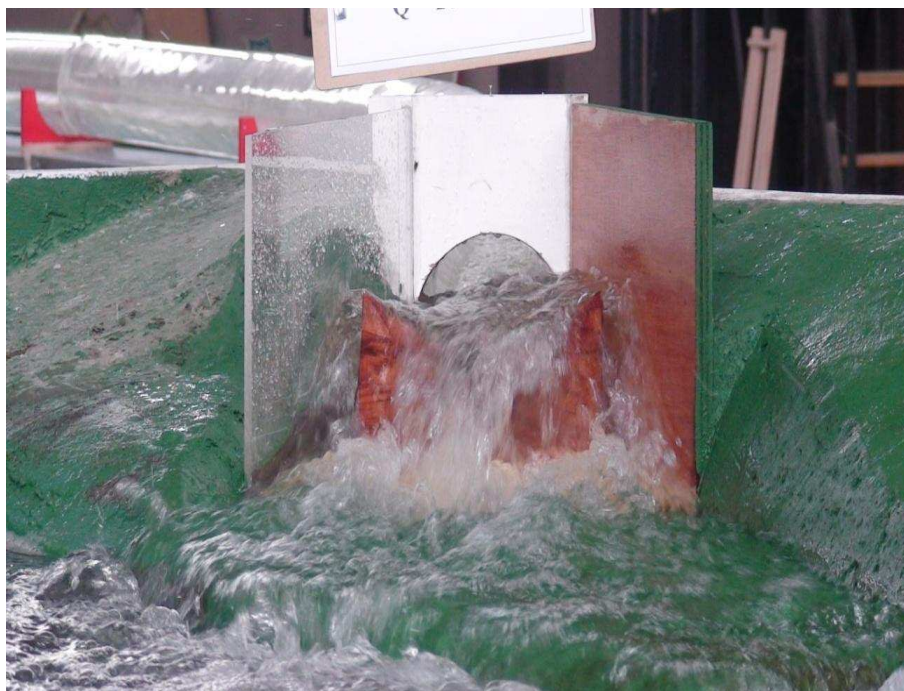
**Fotografía No. 28:** Vista en Perfil del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-1,  $Q_{\text{aprox}}=500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 29:** Vista Frontal del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-1,  $Q_{\text{aprox}}=500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 30:** Detalle del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-1,  $Q_{\text{aprox}}=500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 31:** Vista de Perfil del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-1,  $Q_{\text{aprox}}=1130 \text{ m}^3/\text{s}$





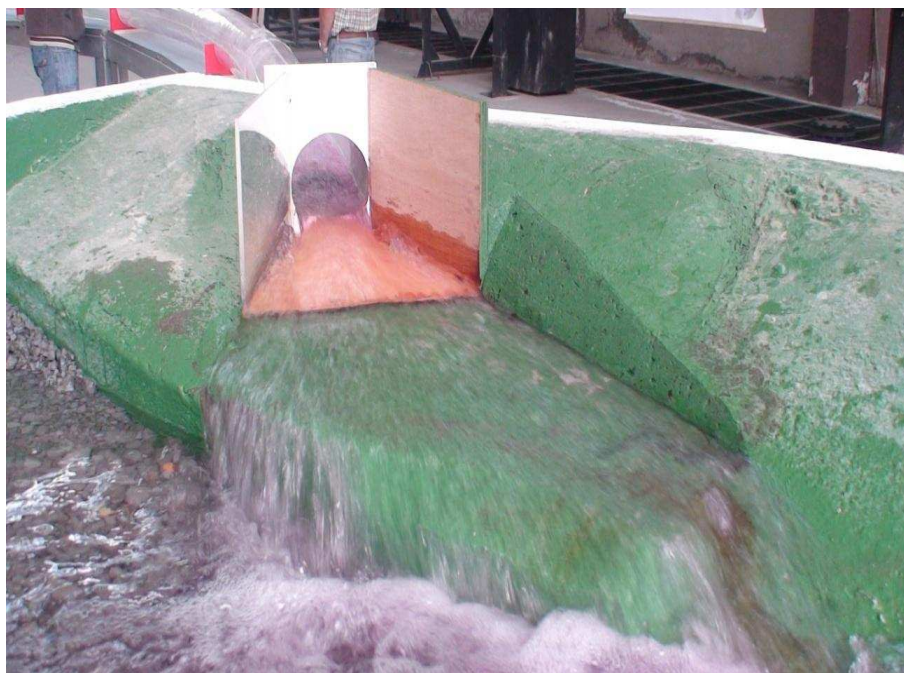
**Fotografía No. 32:** Vista en Planta del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-1,  $Q_{\text{aprox}}=1130 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 33:** Vista en Planta del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-2,  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$



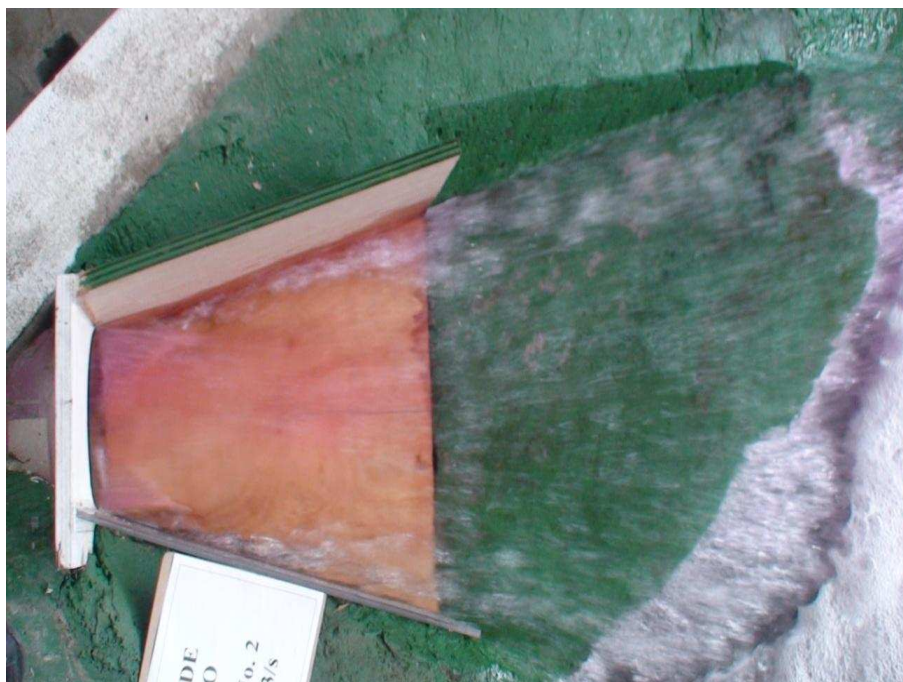
**Fotografía No. 34:** Vista Frontal del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-2,  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 35:** Detalle del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-2,  $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 36:** Vista en Planta del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-2,  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$



**Fotografía No. 37:** Vista Frontal del funcionamiento de la estructura de salida, con la modificación MI-2,  $Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$



**ANEXO F3-2C**  
**DISIPADOR DE ENERGÍA**  
**ESTRUCTURAS CON EXPANSION**

## TUNEL DE DESVÍO

### PRUEBA N°1

Fotografía No. 38: Vista frontal del flujo de salida en el Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )



### PRUEBA N°2

Fotografía No. 39: Vista del flujo en la salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 40:** Vista del flujo en la salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=200 \text{ m}^3/\text{s}$ )



### PRUEBA N°3

**Fotografía No. 41:** Vista frontal del flujo de salida en el Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}= 500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 42:** Vista del flujo de salida en el Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=500 \text{ m}^3/\text{s}$ )



#### PRUEBA N°4

**Fotografía No. 43:** Imagen superior del flujo en la salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=800.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )

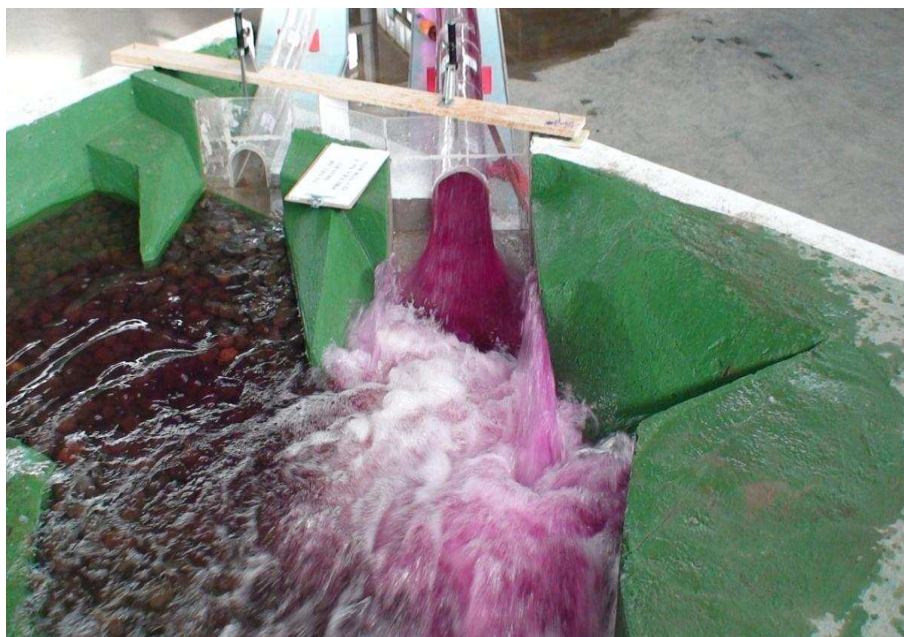


**Fotografía No. 44:** Imagen superior del flujo en la salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=800.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## PRUEBA N°5

**Fotografía No. 45:** Imagen del flujo en la salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=1130.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 46:** Imagen superior del flujo en la salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=1130.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 47:** Imagen del flujo en la salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD}=1130.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 48:** Imagen de la estructura de salida del Túnel de Desvío, movimiento de material sólido sobre el río. ( $Q_{TD}=1130.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## DESCARGA INTERMEDIA

### PRUEBA N° 1

**Fotografía No. 49:** Vista del flujo en la salida de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=25.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 50:** Vista superior del flujo en la salida de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=25.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## PRUEBA N°2

**Fotografía No. 51:** Vista del flujo de salida de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=100.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**PRUEBA N°3****Fotografía No. 52:** Vista frontal del flujo de salida de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=150.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )**Fotografía No. 53:** Vista superior del flujo de salida de la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=150.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )

**PRUEBA N° 4****Fotografía No. 54:** Vista lateral del flujo de la salida en la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=200.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )**Fotografía No. 55:** Vista frontal del flujo de la salida en la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=200.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )

**Fotografía No. 56:** Vista frontal del flujo de la salida en la Descarga Intermedia, ( $Q_{DI}=200.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



### **PRUEBA COMBINADA N° 1 TÚNEL DE DESVÍO:**

**Fotografía No. 57:** Prueba combinada con el Pitot, en el punto 2TD, ( $Q_{TD} = 99.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 23.7 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 58:** Prueba combinada con el Pitot, en el punto 4TD, ( $Q_{TD} = 99.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 23.7 \text{ m}^3/\text{s}$ )

**Fotografía No. 59:** Vista superior de la estructura de salida del Túnel de Desvío, ( $Q_{TD} = 99.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 23.7 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 60:** Vista superior del flujo de salida del Túnel de Desvío y la descarga intermedia, ( $Q_{TD} = 99.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 23.7 \text{ m}^3/\text{s}$ )



#### DESCARGA INTERMEDIA:

**Fotografía No. 61:** Vista lateral de la medición con el Pitot en el punto 3DI, ( $Q_{TD} = 99.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 23.7 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 62:** Vista frontal de la medición con el Pitot en el punto 5DI, ( $Q_{TD} = 99.55 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 23.7 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## PRUEBA COMBINADA N° 2 TÚNEL DE DESVÍO:

**Fotografía No. 63:** Toma de medida en el punto TD-9 del túnel de desvío ( $Q_{TD} = 199.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 103.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 64:** Toma de medida en el punto 2TD del túnel de desvío ( $Q_{TD}=199.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI}=103.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 65:** Toma de medida en el punto 5 TD a la salida del túnel de desvío ( $Q_{TD}=199.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI}=103.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 66:** Vista superior del flujo de salida del túnel de desvío ( $Q_{TD} = 199.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 103.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## DESCARGA INTERMEDIA

**Fotografía No. 67:** Toma de medida en el punto 2 DI a la salida de la descarga Intermedia ( $Q_{TD} = 199.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DI} = 103.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 68:** Vista superior de la salida del flujo en la Descarga Intermedia ( $Q_{TD}=199.25$   $m^3/s$ ,  $Q_{DI}=103.00$   $m^3/s$ )



**Fotografía No. 69:** Vista superior de la salida del flujo de la Descarga Intermedia y el Túnel de Desvío ( $Q_{TD}=199.25$   $m^3/s$ ,  $Q_{DI}=103.00$   $m^3/s$ )



**Fotografía No. 70:** Vista superior de la salida del flujo de la Descarga Intermedia y el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 199.25 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 103.00 \text{ m}^3/\text{s}$ )



### PRUEBA COMBINADA N° 3 TÚNEL DE DESVÍO:

**Fotografía No. 71:** Toma de medida en el punto 2TD en el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 502.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 151.90 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 72:** Toma de medida en el punto 5TD en el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 502.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 151.90 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 73:** Vista superior de la salida del flujo en el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 502.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 151.90 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## DESCARGA INTERMEDIA

**Fotografía No. 74:** Vista lateral de la toma de medición con el Pitot en el punto 2DI de la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 502.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DIP} = 151.90 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 75:** Vista aérea de la salida del flujo en el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 502.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{DIP} = 151.90 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 76:** Vista aérea de la salida del flujo en el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 502.37 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 151.90 \text{ m}^3/\text{s}$ )



#### **PRUEBA COMBINADA N° 4 TÚNEL DE DESVÍO:**

**Fotografía No. 77:** Toma de medida en el punto TD-9 al final del Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 1138.27 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 192.40 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 78:** Toma de medida en el punto 2 TD en la salida Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 1138.27 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 192.40 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 79:** Toma de medida en el punto 2 TD en la salida Túnel de Desvío y 3DI en la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 1138.27 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 192.40 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## DESCARGA INTERMEDIA

**Fotografía No. 80:** Vista superior del flujo de salida en el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 1138.27 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 192.40 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 81:** Vista superior del flujo de salida en el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 1138.27 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 192.40 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 82:** Vista frontal del flujo de salida en el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 1138.27 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 192.40 \text{ m}^3/\text{s}$ )

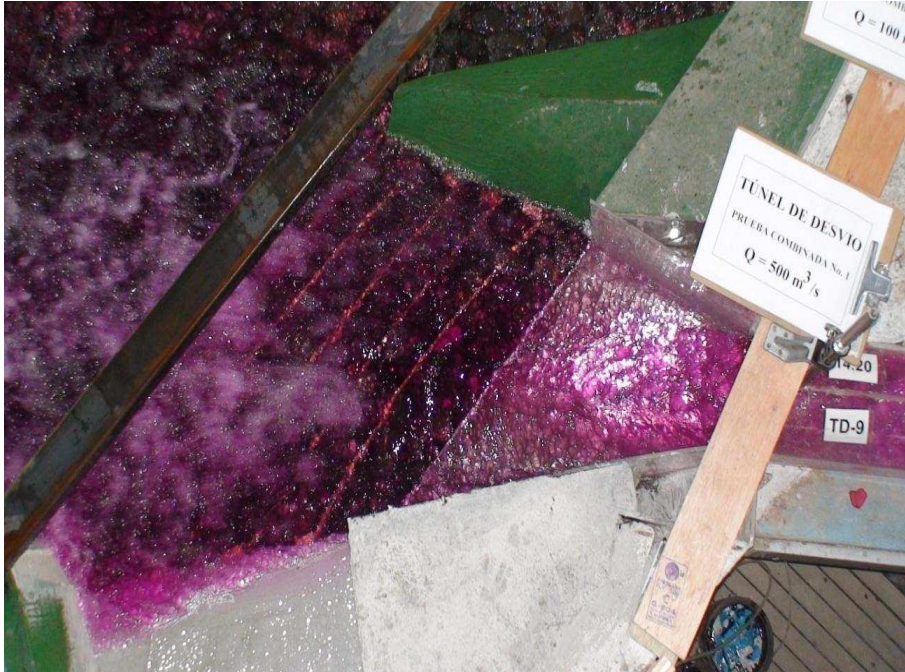


### MDE-3 PRUEBA COMBINADA N° 1 TÚNEL DE DESVÍO:

**Fotografía No. 83:** Vista frontal del flujo de salida en el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 499.62 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 87.6 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 84:** Vista superior del flujo de salida y de la estructura modificada en el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 499.62 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 87.6 \text{ m}^3/\text{s}$ )



### DESCARGA INTERMEDIA:

**Fotografía No. 85:** Toma del punto 4 DI en la salida de la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 499.62 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 87.6 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 86:** Vista superior del flujo de salida en la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 499.62 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 87.6 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 87:** Toma de medidas en el punto 4 DI de la Descarga Intermedia y 5TD del Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 499.62 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 87.6 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 88:** Vista superior del flujo de salida en el Túnel de Desvío y la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 499.62 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 87.6 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## PRUEBA COMBINADA N° 2 TÚNEL DE DESVÍO:

**Fotografía No. 89:** Vista frontal del flujo de salida en el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 799.92 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 186.86 \text{ m}^3/\text{s}$ )

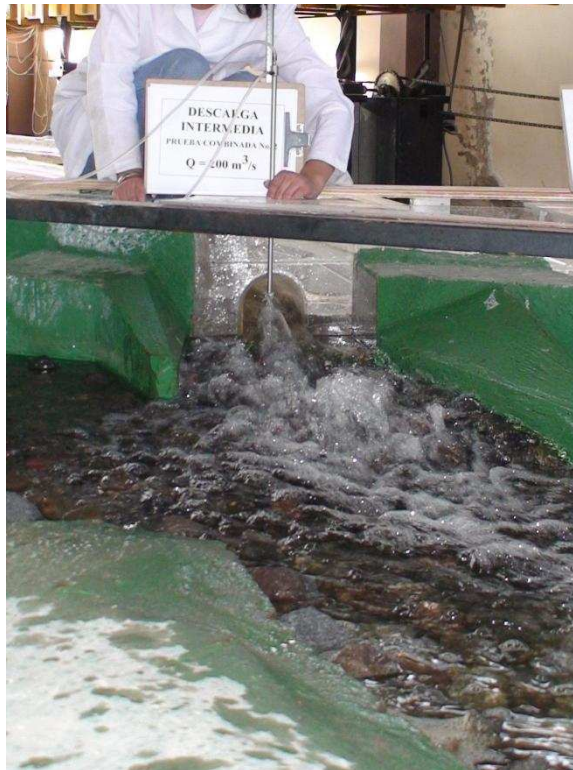


**Fotografía No. 90:** Vista superior del flujo de salida en el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 799.92 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 186.86 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## DESCARGA INTERMEDIA

**Fotografía No. 91:** Vista frontal del flujo de salida de la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 799.92 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 186.86 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 92:** Vista superior del flujo de salida de la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 799.92 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 186.86 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 93:** Vista frontal del flujo de salida de la Descarga Intermedia y Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 799.92 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 186.86 \text{ m}^3/\text{s}$ )





**Fotografía No. 94:** Vista superior del flujo de salida de la Descarga Intermedia y Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 799.92 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 186.86 \text{ m}^3/\text{s}$ )



### PRUEBA COMBINADA N° 3 TÚNEL DE DESVÍO:

**Fotografía No. 95:** Vista frontal del flujo de salida del Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 1001.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dip} = 200.05 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 96:** Vista frontal de la estructura de salida modificada del Túnel de Desvío ( $Q_{TDP} = 1001.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 200.05 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 97:** Vista superior del flujo en la estructura de salida modificada del Túnel de Desvío ( $Q_{TDP} = 1001.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 200.05 \text{ m}^3/\text{s}$ )



## DESCARGA INTERMEDIA

**Fotografía No. 98:** Vista frontal del flujo de salida de la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 1001.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 200.05 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 99:** Vista aérea del flujo de salida de la Descarga Intermedia ( $Q_{TDp} = 1001.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 200.05 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 100:** Vista frontal de la salida del flujo de la Descarga Intermedia el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 1001.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 200.05 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**Fotografía No. 101:** Vista superior de la salida del flujo de la Descarga Intermedia el Túnel de Desvío ( $Q_{TDp} = 1001.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{Dlp} = 200.05 \text{ m}^3/\text{s}$ )



**ANEXOS 3**  
**REGISTRO DE DATOS TOMADOS**

**ANEXO F1-3A**

**CALCULOS COMPARATIVOS DE VELOCIDADES DEL DISIPADOR  
TIPO KUMIN**

## Túnel de desvío Valores del Modelo

### Prueba No.2

Q=	5,9 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	4,04	42,71	1,382	9,6347	3	16,67	8,53	51,14
PS	7,06	127,1	0,464	1,0881	0	8,15		

### Prueba No.4

Q=	28,2 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	8,58	119,68	2,356	28,0279	3	39,61	18,93	47,79
PS	15,56	280,1	1,007	5,1174	0	20,68		

### Prueba No.5

Q=	53,2 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	13,48	204,41	2,603	34,1934	3	50,67	16,63	32,82
PS	28,68	516,2	1,031	5,3609	0	34,04		

## Túnel de desvío Valores del Prototipo

### Prueba No.2

Q=	104,3	m <sup>3</sup> /s
D=	9	m
B(cajón)=	9	m

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	2,02	10,68	9,769	4,8174	1,5	8,34	4,26	51,14
PS	3,53	31,8	3,283	0,5440	0	4,07		

### Prueba No.4

Q=	498,5	m <sup>3</sup> /s
D=	9	m
B(cajón)=	9	m

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	4,29	29,92	16,662	14,0139	1,5	19,80	9,47	47,79
PS	7,78	70,0	7,120	2,5587	0	10,34		

### Prueba No.5

Q=	940,5	m <sup>3</sup> /s
D=	9	m
B(cajón)=	9	m

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	6,74	51,10	18,403	17,0967	1,5	25,34	8,32	32,82
PS	14,34	129,1	7,287	2,6804	0	17,02		



## Descarga Intermedia Valores del Modelo

### Prueba No.1

Q=	0,9 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	0,72	3,41	2,636	35,0765	3	38,80	31,71	84,56
PS	7,06	127,1	0,071	0,0253	0	7,09		

### Prueba No.2

Q=	5,8 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	8,58	119,68	0,485	1,1856	3	12,77	4,45	60,56
PS	7,34	132,1	0,439	0,9728	0	8,31		

### Prueba No.3

Q=	11,4 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	13,48	204,41	0,558	1,5701	3	18,05	5,26	58,54
PS	11,16	200,9	0,568	1,6257	0	12,79		

## Túnel de desvío Valores del Prototipo

### Prueba No.2

Q=	15,9	m <sup>3</sup> /s
D=	9	m
B(cajón)=	9	m

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	0,36	0,85	18,640	17,5382	1,5	19,40	15,86	84,56
PS	3,53	31,8	0,501	0,0127	0	3,54		

### Prueba No.4

Q=	102,5	m <sup>3</sup> /s
D=	9	m
B(cajón)=	9	m

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	4,29	29,92	3,427	0,5928	1,5	6,38	2,23	60,56
PS	3,67	33,0	3,104	0,4864	0	4,16		

### Prueba No.5

Q=	201,5	m <sup>3</sup> /s
D=	9	m
B(cajón)=	9	m

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	6,74	51,10	3,944	0,7851	1,5	9,03	2,63	29,17
PS	5,58	50,2	4,013	0,8129	0	6,39		

## FLUJO COMBINADO Valores del Modelo

### Prueba No.1

Q TD =	11,3 lt/s
Q DI =	1,4 lt/s
Q (total)=	12,7 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	6,24	78,34	1,621	13,2649	3	22,50	9,45	42,00
PS	10,96	197,3	0,644	2,0920	0	13,05		

### Prueba No.2

Q TD =	11,2 lt/s
Q DI =	11,3 lt/s
Q (total)=	22,5 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	7,36	97,88	2,299	26,6750	3	37,03	19,40	52,39
PS	12,87	231,7	0,971	4,7619	0	17,63		

### Prueba No.4

Q TD =	50,8 lt/s
Q DI =	5,7 lt/s
Q (total)=	56,5 lt/s
D=	18 cm
B(cajón)=	18 cm

	Calado H1,H2 cm	AREA cm <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades cm	Z cm	E cm	ΔE cm	% Perdida
TD-9	14,76	223,32	2,530	32,3111	3	50,07	9,01	17,99
PS	37,53	675,5	0,836	3,5311	0	41,06		

## FLUJO COMBINADO Valores del Prototipo

### Prueba No.1

Q TD =	199,8 m <sup>3</sup> /s
Q DI =	24,7 m <sup>3</sup> /s
Q (total)=	224,5 m <sup>3</sup> /s
D=	9 cm
B(cajón)=	9 cm

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	3,12	19,59	11,463	6,6325	1,5	11,25	4,73	42,00
PS	5,48	49,3	4,552	1,0460	0	6,53		

### Prueba No.2

Q TD =	198,0 m <sup>3</sup> /s
Q DI =	199,8 m <sup>3</sup> /s
Q (total)=	397,7 m <sup>3</sup> /s
D=	9 cm
B(cajón)=	9 cm

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	3,68	24,47	16,255	13,3375	1,5	18,52	9,70	52,39
PS	6,435	57,9	6,868	2,3809	0	8,82		

### Prueba No.4

Q TD =	898,0 m <sup>3</sup> /s
Q DI =	100,8 m <sup>3</sup> /s
Q (total)=	998,8 m <sup>3</sup> /s
D=	9 cm
B(cajón)=	9 cm

	Calado H1,H2 m	AREA m <sup>2</sup>	Velocidades m/s	Carga de Velocidades m	Z m	E m	ΔE m	% Perdida
TD-9	7,38	55,83	17,890	16,1555	1,5	25,04	4,50	17,99
PS	18,765	168,9	5,914	1,7656	0	20,53		

**ANEXO F2-3B**

**CALCULOS COMPARATIVOS DE VELOCIDADES DE LA  
ESTRUCTURA CON EXPANSION**

**PRUEBA 1**

Q=	200	m <sup>3</sup> /s
COTA rio=	yn rio	msnm

PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,45	1,44	1,43	1,42	1,44	3,16	0,0000	A.R.
SALIDA -1	1,39	1,43	1,4	1,39	1,40	3,09	10,9722	A.R.
SALIDA-2	0,93	0,95	0,96	0,97	0,95	2,10	59,8666	A.R.

**PRUEBA 2**

Q=	200	m <sup>3</sup> /s
COTA rio=	1272,42	msnm

PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,42	1,42	1,41	1,41	1,42	3,11	0,0000	A.R.
SALIDA -1	1,41	1,43	1,43	1,43	1,43	3,14	5,7823	A.R.
SALIDA-2	0,86	0,86	0,89	0,87	0,87	1,91	65,6517	D.R.

**PRUEBA 3**

Q=	200	m <sup>3</sup> /s
COTA rio=	1273,42	m

PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,42	1,44	1,45	1,44	1,44	3,16	0,0000	A.R.
SALIDA -1	1,33	1,37	1,38	1,36	1,36	2,99	16,4313	A.R.
SALIDA-2	0,76	0,77	0,75	0,77	0,76	1,68	74,3623	D.R.

**PRUEBA 4**

Q=	500	m <sup>3</sup> /s
COTA rio=		m

PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,86	1,83	1,84	1,84	1,84	4,05	0,0000	A.R.
SALIDA -1	1,83	1,84	1,84	1,83	1,84	4,04	5,0999	A.R.
SALIDA-2	1,75	1,71	1,66	1,65	1,69	3,72	20,3445	D.R.

PRUEBA 5								
Q= 500 m <sup>3</sup> /s								
COTA rio= m								
PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,7	1,68	1,66	1,66	1,68	3,69	0,0000	A.R
SALIDA -1	1,65	1,68	1,66	1,66	1,66	3,66	6,5693	A.R
SALIDA-2	1,3	1,33	1,35	1,33	1,33	2,92	41,3949	D.R

PRUEBA 6								
Q= 500 m <sup>3</sup> /s								
COTA rio= m								
PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,65	1,65	1,66	1,65	1,65	3,64	0,0000	A.R
SALIDA -1	1,69	1,69	1,71	1,71	1,70	3,74	-0,1168	A.R
SALIDA-2	1,07	0,99	1,11	1,3	1,12	2,46	57,4096	D.R

PRUEBA 7								
Q= 500 m <sup>3</sup> /s								
COTA rio= m								
PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,59	1,59	1,61	1,62	1,60	3,53	0,0000	A.R
SALIDA -1	1,58	1,59	1,59	1,6	1,59	3,50	7,0675	D.R
SALIDA-2	0,73	0,7	0,75	0,69	0,72	1,58	81,4108	D.R

PRUEBA 8								
Q= 500 m <sup>3</sup> /s								
COTA rio= m								
PUNTO	VELOCIDAD (m/S)				PROMEDIO (m/s)	VEL.CORR. (m/s)	% Perdida	OBS.
TD-9	1,57	1,59	1,62	1,61	1,60	3,51	0,0000	A.R
SALIDA -1	0,18	0,14	0,11	0,14	0,14	0,31	97,6080	D.R
SALIDA-2	0	0	0	0	0,00	0,00	100,0000	D.R

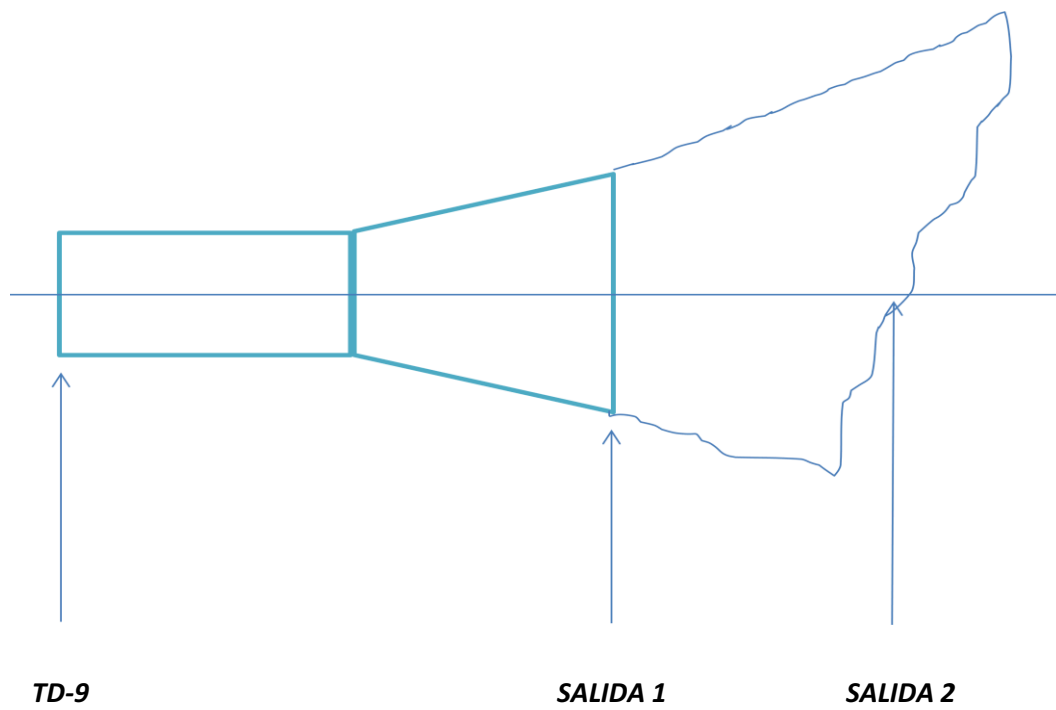
NOTAS:

A.R. ANTES DEL RESALTO

S.R. SOBRE EL RESALTO

D.R. DESPUES DEL RESALTO

EL % DE PERDIDA ES RESPECTO AL PUNTO TD-9





**ANEXO F3-3C**

**CUADROS PRUEBAS COMBINADAS PITOT**

Está compuesta de cuatro pruebas:

Prueba Combinada N° 1

**Túnel de desvío:**

**Q** = 100 m<sup>3</sup>/s

**Descarga Intermédia**

**Q** = 25 m<sup>3</sup>/s

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	1
FECHA:	03-III-2010

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	4.06	cm
Q realmod =	5.6	l/s
Q realproto =	99.55	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	23.57	4.39
TD - 9	14.24	16.25	2.01
VM3	14.3	25.91	11.61

PITOT			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	Δh (cm)
TD - 9	131.9	118.5	13.4
1TD	133.8	121.3	12.5
2TD	133.1	120.9	12.2
3TD	133.8	118.3	15.5
4TD	134.9	132.5	2.4
5TD	134.90	132.1	2.8
6TD	135.1	131.6	3.5

**Observaciones:** Punto 4,5, 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	1
FECHA:	03-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	4.1	cm
Q realmod =	5.8	l/s
Q realproto =	101.69	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	23.52	4.34
TD - 9	14.24	16.21	1.97
VM3	14.3	25.4	11.1

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	131.90	119.1	12.8
1TD	134.10	121.4	12.7
2TD	133.10	119.7	13.4
3TD	133.80	117.9	15.9
4TD	135.00	133.4	1.6
5TD	134.90	132.4	2.5
6TD	135.20	130.8	4.4

**Observaciones:** Punto 4,5, 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	1
FECHA:	03-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	6.25	cm
Q realmod =	1.34	l/s
Q realproto =	23.7	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	40.95	2.55
DI -6	21.16	22.6	1.44
VM3	14.30	25.78	11.48

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	112.9	124	11.1
1DI	116.70	121.1	4.4
2DI	114.5	123	8.5
3DI	113.2	124	10.8
4DI			
5DI			
6DI			

Observaciones: No se puede tomar datos en el punto 4 y 6 por calado muy bajo y piedras.

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBAS COMBINADAS**

PRUEBA #:	1
FECHA:	02-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	6.42	cm
Q realmod =	1.601	l/s
Q realproto =	28.3	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	40.87	2.47
DI -6	21.16	22.35	1.19
VM3	14.30	26.28	11.98

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	122.4	131.70	9.3
1DI	125.30	129.80	4.5
2DI	122.6	132.10	9.5
3DI	122.1	132.00	9.9
4DI			
5DI			
6DI			

Observaciones: No se puede tomar datos en el punto 4 y 6 por calado muy bajo y piedras.

Prueba Combinada N° 2

**Túnel de desvío:**

$Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$

**Descarga Intermédia**

$Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	2
FECHA:	03-III-2010

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	5.71	cm
Q realmod =	11.3	l/s
Q realproto =	199.25	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	25.12	5.94
TD - 9	14.24	17.83	3.59
VM3	14.3	30.53	16.23

PITOT			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	131.1	109.2	21.9
1TD	133.6	116.2	17.4
2TD	132.4	114.5	17.9
3TD	134.5	111.3	23.2
4TD	135.1	120.6	14.5
5TD	134.80	115.3	19.5
6TD	135.5	119.7	15.8

Observaciones: Punto 4,5 y 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	2
FECHA:	03-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	5.73	cm
Q realmod =	11.3	l/s
Q realproto =	200.6	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	25.18	6.00
TD - 9	14.24	17.75	3.51
VM3	14.3	30.85	16.55

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	131.2	111.00	20.2
1TD	133	116.40	16.6
2TD	131.6	113.20	18.4
3TD	131.8	111.40	20.4
4TD	134	128.70	5.3
5TD	133.60	117.20	16.4
6TD	134.1	126.40	7.7

Observaciones: Punto 4,5 y 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	2
FECHA:	02-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.87	cm
Q realmod =	5.83	l/s
Q realproto =	103.00	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.05	3.65
DI -6	21.16	23.51	2.35
VM3	14.30	31.3	17.00

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6			0
1DI	133.50	118.2	15.30
2DI	134	111.3	22.70
3DI	132.8	112	20.80
4DI			
5DI	133.5	109	24.50
6DI			

Observaciones: No se pudo medir 4 y 6 por exceso de burbujas de aire



**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	2
FECHA:	02-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.88	cm
Q realmod =	5.84	l/s
Q realproto =	104.3	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.1	3.7
DI -6	21.16	23.55	2.39
VM3	14.30	30.85	16.55

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	133.40	116.8	16.6
1DI	133.00	118.5	14.5
2DI	138.00	113.5	24.5
3DI	138.50	113	25.5
4DI	132.30	121	11.3
5DI	135.50	118	17.5
6DI	127.50	126.9	0.6

Observaciones: No se pudo medir 4 y 6 por exceso de burbujas de aire

Prueba Combinada Nº 3  
 Túnel de desvío:  
 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Descarga Intermédia  
 $Q = 150 \text{ m}^3/\text{s}$

**TÚNEL DE DESVÍO  
 PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	3
FECHA:	02-III-2010

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.5	cm
Q realmod =	28.4	l/s
Q realproto =	502.37	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	28.05	8.87
TD - 9	14.24	21.35	7.11
VM3	14.3	36.46	22.16

PITOT			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	126.60	93.1	33.5
1TD	130.40	102.6	27.8
2TD	129.80	100.8	29
3TD	128.50	101.5	27
4TD	135.00	122.3	12.7
5TD	130.50	120.3	10.2
6TD	135.00	116.2	18.8

Observaciones: Punto 4,5 y 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	3
FECHA:	02-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.51	cm
Q realmod =	28.5	l/s
Q realproto =	503.29	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	27.87	8.69
TD - 9	14.24	21.37	7.13
VM3	14.3	36.45	22.15

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	126.9	97.90	29.00
1TD	130.8	101.80	29.00
2TD	127.7	100.80	26.90
3TD	127.8	101.20	26.60
4TD	135.1	121.60	13.50
5TD	131.90	118.60	13.30
6TD	134.4	114.30	20.10

Observaciones: Punto 4,5 y 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	3
FECHA:	02-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.51	cm
Q realmod =	8.60	l/s
Q realproto =	151.9	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.77	4.37
DI -6	21.16	24.07	2.91
VM3	14.30	36.36	22.06

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	129.7	100.5	29.2
1DI	127.00	104.5	22.50
2DI	130	99.5	30.50
3DI	131.2	98.7	32.50
4DI	125.2	110.5	14.70
5DI	129.7	101.5	28.20
6DI	129.6	101.5	28.10

Observaciones:	Dificultades en medir en la zona de las piedras
----------------	---

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	3
FECHA:	02-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	12.52	cm
Q realmod =	8.614	l/s
Q realproto =	152.3	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.79	4.39
DI -6	21.16	24.04	2.88
VM3	14.30	37.27	22.97

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	142.60	114.5	28.1
1DI	138.60	118.1	20.5
2DI	141.00	115.3	25.7
3DI	145.50	113	32.5
4DI	135.00	119	16
5DI			
6DI			

Observaciones: Puntos 5 y 6 existe mucho flujo con aire.

Prueba Combinada N° 4  
 Túnel de desvío:  
 $Q = 1130 \text{ m}^3/\text{s}$   
 Descarga Intermédia  
 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$

**TÚNEL DE DESVÍO  
 PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	4
FECHA:	03-III-2010

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	15.46	cm
Q realmod =	64.4	l/s
Q realproto =	1138.27	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	36.1	16.92
TD - 9	14.24	27.62	13.38
VM3	14.3	43.9	29.6

PITOT			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	118.8	81.5	37.3
1TD	127.1	81.9	45.2
2TD	125.3	75.7	49.6
3TD	125.4	69.3	56.1
4TD	132.8	84.3	48.5
5TD	129.80	89.6	40.2
6TD	142.5	67.6	74.9

Observaciones: Punto 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	4
FECHA:	03-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	15.52	cm
Q realmod =	64.4	l/s
Q realproto =	1138.27	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	36.15	16.97
TD - 9	14.24	27.65	13.41
VM3	14.3	44.1	29.8

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	119.1	81.6	37.5
1TD	128.8	87.1	41.7
2TD	123.1	75.9	47.2
3TD	124.1	69.4	54.7
4TD	130.9	81.9	49
5TD	132.20	89.3	42.9
6TD	132.3	68.8	63.5

Observaciones: Punto 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	4
FECHA:	3-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.6	cm
Q realmod =	10.88	l/s
Qrealproto =	192.4	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.94	4.54
DI -6	21.16	24.44	3.28
VM3	14.30	44.26	29.96

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	94.2	129.6	35.40
1DI	101.50	125.5	24.00
2DI	96.7	128.4	31.70
3DI	95.1	131	35.90
4DI	123.5	130.5	7.00
5DI	122.6	131.8	9.20
6DI	124.3	130.7	6.40

Observaciones: Punto y 6 no se pudo medir
---



**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA**

PRUEBA #:	4
FECHA:	3-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.58	cm
Q realmod =	11.58	l/s
Qrealproto =	204.7	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.93	4.53
DI -6	21.16	24.6	3.44
VM3	14.30	43.9	29.6

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	99.90	130.70	30.80
1DI	101.50	130.10	28.60
2DI	99.00	132.00	33.00
3DI	98.00	133.10	35.10
4DI	117.10	119.00	1.90
5DI	102.20	130.50	28.30
6DI	117.00	120.50	3.50

Observaciones: Punto y 6 no se pudo medir
---

PRUEBAS COMBINADAS Nº 2  
Está compuesta de tres pruebas:

Prueba Combinada Nº 1

**Túnel de desvío:**

**Q** = 500 m<sup>3</sup>/s

**Descarga Intermédia**

**Q** = 100 m<sup>3</sup>/s

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA N#2**

PRUEBA #:	1
FECHA:	08-III-2010

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.47	cm
Q realmod =	28.3	l/s
Q realproto =	499.62	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	28.1	8.92
TD - 9	13.75	21.06	7.31
VM3	14.3	35.6	21.3

PITOT			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	Δh (cm)
TD - 9	126.5	91.6	34.9
1TD	129.6	97.3	32.3
2TD	128.3	93.9	34.4
3TD	129	90.5	38.5
4TD	133.2	119	14.2
5TD	133.60	99.4	34.2
6TD	133.7	93.2	40.5

Observaciones: Punto 4,5, 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	1
FECHA:	08-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	9.48	cm
Q realmod =	28.3	l/s
Q realproto =	500.54	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	29.08	9.9
TD - 9	13.75	21.06	7.31
VM3	14.3	35.59	21.29

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	126.60	95.00	31.60
1TD	133.90	102.50	31.40
2TD	131.20	94.10	37.10
3TD	130.50	93.30	37.20
4TD	133.90	116.60	17.30
5TD	133.60	93.20	40.40
6TD	134.90	103.40	31.50

Observaciones: Punto 4,5, 6 Excesivo ingreso de aire en el pitot mayor dificultad de medición

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	1
FECHA:	08-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.24	cm
Q realmod =	4.95	l/s
Q realproto =	87.6	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	41.95	3.55
DI -6	21.07	23.36	2.29
VM3	14.30	35.6	21.3

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	111.10	130.30	19.20
1DI	112.00	130.00	18.00
2DI	111.10	129.90	18.80
3DI	114.00	128.10	14.10
4DI	121.70	122.80	1.10
5DI	121.70	122.60	0.90
6DI	118.60	125.20	6.60

Observaciones: Dificultades en los puntos 4,5, y 6

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	1
FECHA:	08-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	10.35	cm
Q realmod =	5.1	l/s
Q realproto =	90.2	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.03	3.63
DI -6	21.07	23.24	2.17
VM3	14.30	35.65	21.35

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	111.0	130.1	19.1
1DI	116.2	126.7	10.5
2DI	110.4	131.2	20.8
3DI	111.0	130.0	19.0
4DI	121.5	123.0	1.5
5DI	120.7	123.1	2.4
6DI	118.6	125.2	6.6

Observaciones: Dificultades en los puntos 4,5, y 6

PRUEBAS COMBINADAS Nº 2  
Está compuesta de tres pruebas:

Prueba Combinada Nº 2

**Túnel de desvío:**

**Q = 800 m<sup>3</sup>/s**

**Descarga Intermedia**

**Q = 200 m<sup>3</sup>/s**

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	2
FECHA:	08-III-2010

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	12.48	cm
Q realmod =	45.2	l/s
Q realproto =	799.12	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	30.73	11.55
TD - 9	13.75	23.82	10.07
VM3	14.3	40.2	25.9

PITOT			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	Δh (cm)
TD - 9	122.8	84.1	38.7
1TD	127.9	85.6	42.3
2TD	125.4	82.8	42.6
3TD	126.6	84.1	42.5
4TD	133	103.1	29.9
5TD	132.50	78.6	53.9
6TD	130.5	124.3	6.2

Observaciones:
----------------

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	2
FECHA:	08-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	12.49	cm
Q realmod =	45.3	l/s
Q realproto =	800.26	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	30.73	11.55
TD - 9	13.75	23.81	10.06
VM3	14.3	40.12	25.82

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	122.9	84.30	38.6
1TD	128.5	86.40	42.1
2TD	126.5	82.90	43.6
3TD	126.9	84.70	42.2
4TD	134.5	109.20	25.3
5TD	134.30	81.50	52.8
6TD	130.9	101.50	29.4

Observaciones:

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	2
FECHA:	08-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.46	cm
Q realmod =	10.57	l/s
Q realproto =	186.60	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.68	4.28
DI -6	21.07	24.16	3.09
VM3	14.30	40.11	25.81

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	103.5	134.1	30.6
1DI	112.90	128	15.1
2DI	103.5	134.7	31.2
3DI	106.5	132.6	26.1
4DI	113.4	121	7.6
5DI	105.2	127.1	21.9
6DI	117.1	118.4	1.3

**Observaciones:** No se pudo medir 4 y 6 por exceso de burbujas de aire



**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	2
FECHA:	08-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.41	cm
Q realmod =	10.45	l/s
Q realproto =	184.8	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.83	4.43
DI -6	21.07	24.29	3.22
VM3	14.30	40.21	25.91

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	103.00	128.3	25.30
1DI	106.50	125.5	19.00
2DI	100.50	130	29.50
3DI	106.50	132.6	26.10
4DI			
5DI	103.50	129	25.50
6DI	117.10	118.4	1.30

**Observaciones:** No se pueden medir 4 y 6 por exceso de burbujas de aire

PRUEBAS COMBINADAS Nº 2  
Está compuesta de tres pruebas:

Prueba Combinada Nº 3

**Túnel de desvío:**

**Q = 1000 m<sup>3</sup>/s**

**Descarga Intermédia**

**Q = 200 m<sup>3</sup>/s**

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	3
FECHA:	09-III-2010

DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA		
Ho =	1.36	cm
H real =	14.29	cm
Q realmod =	56.6	l/s
Q realproto =	1001.02	m <sup>3</sup> /s

DATOS EN SECCIONES			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	33.11	13.93
TD - 9	13.75	25.51	11.76
VM3	14.3	42.64	28.34

PITOT			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	Δh (cm)
TD - 9	120.60	78.9	41.7
1TD	126.10	82.6	43.5
2TD	124.00	76	48
3TD	124.00	74.5	49.5
4TD	134.00	107.3	26.7
5TD	134.20	78.9	55.3
6TD	134.10	76.5	57.6

Observaciones:

**TÚNEL DE DESVÍO  
PRUEBA COMBINADA # 2**

PRUEBA #:	3
FECHA:	09-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	1.36	cm
H real =	14.29	cm
Q realmod =	56.6	l/s
Q realproto =	1001.02	m3/s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
TD - 8	19.18	33.11	13.93
TD - 9	13.75	25.52	11.77
VM3	14.3	42.69	28.39

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
TD - 9	120.8	79.50	41.30
1TD	125.9	80.90	45.00
2TD	124.1	77.00	47.10
3TD	124	81.50	42.50
4TD	134.5	103.20	31.30
5TD	133.50	75.00	58.50
6TD	133	75.30	57.70

Observaciones:
----------------

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	3
FECHA:	09-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.8	cm
Q realmod =	11.34	l/s
Q realproto =	200.50	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.93	4.53
DI -6	21.16	24.45	3.29
VM3	14.30	42.22	27.92

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	106	132.7	26.70
1DI	112.70	126.7	14.00
2DI	108.7	129.7	21.00
3DI	102.3	134.7	32.40
4DI	121.7	129	7.30
5DI	115.1	134.3	19.20
6DI	118	126.6	8.60

**Observaciones:** No se pudo medir 4 y 6 por exceso de burbujas de aire, dificultades en la medición

**DESCARGA INTERMEDIA  
PRUEBA COMBINADA #2**

PRUEBA #:	3
FECHA:	09-III-2010

<b>DATO EN VERTEDERO DE MEDIDA</b>		
Ho =	0.33	cm
H real =	13.58	cm
Q realmod =	10.84	l/s
Q realproto =	191.6	m <sup>3</sup> /s

<b>DATOS EN SECCIONES</b>			
PUNTO	Ho (cm)	H med. (cm)	Calado (cm)
DI -5	38.4	42.93	4.53
DI -6	21.16	24.38	3.22
VM3	14.30	42.56	28.26

<b>PITOT</b>			
PUNTO	h1 (cm)	h2 (cm)	$\Delta h$ (cm)
DI -6	97.80	127.3	29.50
1DI	106.00	121.5	15.50
2DI	99.80	126	26.20
3DI	95.60	129.2	33.60
4DI	120.70	121.7	1.00
5DI	104.00	134.8	30.80
6DI	120.70	122.2	1.50

**Observaciones:** No se pudo medir 4 y 6 por exceso de burbujas de aire