

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL**

**MODELO FÍSICO HIDRÁULICO DE TRES DISIPADORES DE  
ENERGIA APLICADO A LA PRESA ESCANA**

**Por:**

**JESÚS ALBERTO JIMÉNEZ MENDOZA**

Tesis presentada a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar por el Grado Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil

**MAYO DE 2011**

**TARIJA – BOLIVIA**

V°B°

-----  
Msc. Ing. Alberto Yurquina Flores

**DECANO**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y**

**TECNOLOGIA**

-----  
Lic. Gustavo Succi Aguirre

**VICEDECANO**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y**

**TECNOLOGIA**

**APROBADA POR:**

**TRIBUNAL:**

.....  
**Msc. Ing. A. José Navía Ojeda**

.....  
**Ing. Ivar Fernando Colodro Mendivil**

.....  
**Msc. Ing. Jaime Zenteno Benitez**

El tribunal calificador de la presente tesis, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el trabajo, siendo las mismas únicamente responsabilidad del autor.

**DEDICATORIAS:**

Dedicado a mis abuelos, padres, hermanos, a mi familia y amigos. Que sin su apoyo desinteresado no hubiera sido posible la culminación del presente trabajo de investigación.

**AGRADECIMIENTO:**

A Dios que siempre está y estará ahí para todos.

A mis Docentes, Profesores y compañeros por su colaboración en todo el transcurso de mis estudios.

Agradecer especialmente al Docente Ing. Marcelo Pacheco Núñez, por haberme dado la oportunidad de elaborar éste tema de investigación.

**PENSAMIENTO:**

Me lo contaron y lo olvidé,  
lo vi y lo entendí, lo hice y lo  
aprendí.

**Confucio**

# ÍNDICE

DEDICATORIAS

AGRADECIMIENTOS

PENSAMIENTO

RESUMEN

	<b>Página</b>
INTRODUCCIÓN.....	1
1 Justificación.....	2
2 Objetivos.....	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 Semejanza Geométrica, Cinemática y Dinámica.....	4
3.1 Similitud Física.....	4
3.2 Similitud Geométrica.....	5
3.3 Similitud Cinemática.....	6
3.4 Similitud de Distribución de Masas.....	7
3.5 Similitud Dinámica.....	7
4 Similitud de Froude.....	8
4.1 Número de Froude.....	9
5 Alcance del Trabajo.....	11
6 Recopilación e Información Necesaria.....	11
6.1 Información requerida.....	11
6.2 Información a producir.....	12
6.2.1 Ubicación.....	12
7 Consideraciones.....	12
7.1 Consideraciones Técnicas.....	12
7.2 Consideraciones Económicas.....	13
7.3 Consideraciones Ambientales.....	14

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO

1.1 Teoría de Modelos.....	15
1.1.1 Modelos utilizados para Estudios.....	16
1.1.2 Modelos Físicos.....	17
1.1.3 Escalas a satisfacer para alcanzar la similitud entre Prototipo y Modelo.....	20
1.1.3.1 Escala.....	20
1.1.3.2 Fuerzas que intervienen en el Movimiento.....	21

1.1.3.3 Utilización del Análisis Dimensional y de las Ecuaciones Físico – Matemáticas de los casos en estudio.....	23
1.1.3.3.1 Análisis Dimensional.....	23
1.1.3.3.2 Ecuaciones Físico – Matemáticas de los casos en Estudio.....	24
1.1.4 Laboratorio de Hidráulica.....	27
1.2 Estado de conocimiento sobre Disipadores de Energía.....	30
1.2.1 Definición de Disipadores de Energía .....	30
1.2.2 Aplicación de Disipadores de Energía.....	31
1.2.3 Estudio en Modelo y en Prototipo.....	33
1.2.3.1 Estudio en Modelo Físico.....	33
1.2.3.2 Estudio en Prototipo.....	34
1.2.4 Flujos sobre Disipadores de Energía.....	36
1.2.5 Resalto Hidráulico.....	37
1.2.6 Tipos de Resalto Hidráulico.....	40
1.2.7 Eficiencia del Resalto Hidráulico.....	42
1.2.8 Pérdida de Energía del Resalto Hidráulico.....	42
1.3 Descripción de la Infraestructura, Metodología Experimental y datos acerca del Prototipo.....	43
1.3.1 Análisis del Campo de Aplicación y Cobertura del Estudio.....	44
1.3.2 Idealización del Modelo Hidráulico.....	46
1.3.3 Estructura soporte del Modelo.....	50
1.3.4 Proyecto Integrado Escana.....	51
1.3.4.1 Antecedentes.....	51
1.3.4.2 Área del Proyecto.....	52
1.3.4.3 Justificación del Proyecto Integrado Escana.....	53
1.3.4.3.1 Objetivos del Proyecto Integrado Escana.....	54
1.3.4.3.2 Metas del Proyecto Integrado Escana.....	54
1.3.4.3.3 Componentes del Proyecto Integrado Escana.....	55
1.3.4.3.3.1 Componente Pecuario.....	55
1.3.4.3.3.2 Componente Forestal.....	55
1.3.4.3.3.3 Componente de Participación de la Mujer.....	55
1.3.4.3.3.4 Componente de Extensión y Crédito.....	56
1.3.4.3.3.5 Componente Energético.....	56
1.3.4.3.3.6 Componente de Riego.....	56
1.3.4.3.3.7 Componente Agrícola.....	59

	<b>Página</b>
1.4 Modelaje Hidráulico y Trabajo de Laboratorio .....	62
1.4.1 Adquisición de datos en el Laboratorio.....	62
1.4.1.1 Instrumentos para la Medición en Laboratorio.....	63
1.4.2 Medición de Datos.....	71
1.4.3 Administración de los Archivos Registrados.....	72
1.4.4 Metodología Experimental.....	72

## **CAPÍTULO II**

### **METODOLOGÍA DE DISEÑO DE DISIPADORES DE ENERGÍA**

2.1 Metodología de Diseño de Disipadores de Energía.....	75
2.1.1 Disipadores de Energía.....	75
2.1.2 Tipos de Disipadores de Energía.....	76
2.1.3 El Pozo Amortiguador.....	76
2.1.3.1 Metodología para el Diseño de un Pozo Amortiguador Ubicado al pie de un Cimacio Vertedor.....	77
2.1.3.2 Metodología para el Diseño de un Pozo Amortiguador Ubicado al Pie de una Rápida.....	82
2.1.4 El Estanque Amortiguador.....	89
2.1.4.1 Principio de Disipación.....	90
2.1.4.2 Tipos de Accesorios que se emplean en el Estanque Amortiguador (Funciones).....	91
2.1.4.2.1 Dientes deflectores.....	91
2.1.4.2.2 Dados Amortiguadores.....	93
2.1.4.2.3 Umbral Terminal.....	95
2.1.4.2.4 Escalones.....	97
2.1.4.3 Metodología de Diseño de un Estanque Tipo I.....	98
2.1.4.4 Metodología de Diseño de un Estanque Tipo III.....	102
2.1.5 El estanque de Inmersión.....	104
2.1.6 El Trampolín o Salto de Esquí.....	105
2.1.7 Estanque y Pozo Amortiguador (Diseño Generalizado).....	107

**CAPÍTULO III**

**ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS**

3.1	Análisis de Datos y Resultados.....	108
3.1.1	Estudio de los Efectos de Escala.....	109
3.1.2	Consideraciones Respecto al Agua de Descarga.....	110
3.1.3	Análisis de Datos de Manera Estadística.....	110
3.1.4	Análisis de Datos en Función de Caudales de Diseño.....	112
3.1.5	Análisis de Datos en Función de la Pérdida de Energía.....	112

**CAPÍTULO IV**

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.1	Conclusiones.....	114
4.2	Recomendaciones.....	128

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>131</b>
--------------------------	------------

**ANEXOS**

## Índice de Figuras

	<b>Página</b>
<b>Figura 1:</b> Proyección lineal del sistema modelo – prototipo Publicado en VERGARA S., Miguel A. Técnicas de modelación en hidráulica (México. Alfa omega, 1993. 294 pág.....	4
<b>Figura 2:</b> Similitud dinámica entre dos fluidos del Modelo y del Prototipo (a y b).....	8
<b>Figura 3:</b> Esquema del estudio de los modelos.....	17
<b>Figura 4:</b> Modelo Numérico de puente de fábrica sobre la garganta de Buitrea (España).....	20
<b>Figura 5:</b> Formación del Resalto Hidráulico.....	38
<b>Figura 6:</b> Energía y profundidades de un Salto Hidráulico .....	38
<b>Figura 7:</b> Esquema del sistema completo de suministro de agua del Laboratorio de Hidráulica, hasta el Modelo Físico Reducido...	45
<b>Figura 8:</b> Esquema del Pozo Amortiguador .....	76
<b>Figura 9:</b> Estanque TIPO III .....	92
<b>Figura 10:</b> Estanque TIPO II .....	94
<b>Figura 11:</b> Estanque amortiguador Tipo I, con umbral terminal liso....	96
<b>Figura 12:</b> Estanque amortiguador Tipo III, con umbral terminal dentado .....	96
<b>Figura 13:</b> Diferencia entre una rápida lisa y rugosa H. Blind .....	97
<b>Figura 14:</b> Longitud del Estanque Tipo I .....	100
<b>Figura 15:</b> Dimensiones de los dientes deflectores Estanque Tipo I....	101
<b>Figura 16:</b> Dimensiones del umbral terminal.....	102
<b>Figura 17:</b> Longitud del Estanque Tipo III .....	103
<b>Figura 18:</b> Variación de caudales en función del tiempo.....	111
<b>Figura 19:</b> Pozo Amortiguador, relación entre caudal y tirante inicial $y_1$ (Coeficiente de correlación = 0,98 %)......	118
<b>Figura 20:</b> Pozo Amortiguador, relación entre caudal y tirante final $y_2$ (Coeficiente de correlación = 0,99%)......	118
<b>Figura 21:</b> Estanque Tipo I, relación entre caudal y tirante inicial $y_1$ (Coeficiente de correlación = 0,98%)......	121
<b>Figura 22:</b> Estanque Tipo I, relación entre caudal y tirante final $y_2$ (Coeficiente de correlación = 0,98%)......	121
<b>Figura 23:</b> Estanque Tipo I, relación entre velocidad y longitud del salto $L_I$ (Coeficiente de correlación = 0,98%)......	122
<b>Figura 24:</b> Estanque Tipo III, relación entre caudal y tirante inicial $y_1$ (Coeficiente de correlación = 0,98%)......	124
<b>Figura 25:</b> Estanque Tipo III, relación entre caudal y tirante final $y_2$ (Coeficiente de correlación = 0,95%)......	125
<b>Figura 26:</b> Estanque Tipo III, relación entre velocidad y longitud del salto $L_{III}$ (Coeficiente de correlación = 0,98 %)......	125

## Índice de Fotos

		<b>Página</b>
<b>Foto</b>	<b>1:</b> Departamento de Antioquía, Colombia Desarrollo Hidroeléctrico del río Nare, Central de Guatapé. Modelo Hidráulico Similitud Froude, escala 30. Caudal captado: 62 m <sup>3</sup> /s Laboratorio de Hidráulica Universidad Nacional, Facultad de Minas.....	19
<b>Foto</b>	<b>2:</b> Foto del Interior del Laboratorio de hidráulica de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (Tarija-Bolivia).....	28
<b>Foto</b>	<b>3:</b> Foto de la Presa de forcross situada en YORKSHIRE (REINO UNIDO).....	30
<b>Foto</b>	<b>4:</b> Estanque Amortiguador de la Presa de forcross situada en yorkshire (Reino Unido).....	31
<b>Foto</b>	<b>5:</b> Modelos Físicos de dos Virus [Instituto de Virología de Wisconsin - Estados Unidos].....	33
<b>Foto</b>	<b>6:</b> Departamento de Antioquia, Colombia desarrollo Hidroeléctrico del río Nare Central de Guatapé Modelo Hidráulico, escala 30. Laboratorio de Hidráulica Universidad Nacional, Facultad de Minas.....	34
<b>Foto</b>	<b>7:</b> Municipio de Medellín Colombia Confluencia de las quebradas Hueso y pelahueso (Laboratorio de Hidráulica Universidad Nacional - Facultad de Minas). PROTOTIPO.....	35
<b>Foto</b>	<b>8:</b> Municipio de Medellín Colombia Confluencia de las quebradas Hueso y pelahueso (Laboratorio de Hidráulica Universidad Nacional - Facultad de Minas). Modelo Físico reducido de fondo fijo escala 30. MODELO.....	35
<b>Foto</b>	<b>9:</b> Bombas en paralelo que impulsan el sistema instalado en el Laboratorio de Hidráulica (con capacidad de 150 lt/seg.), a una altura geométrica de 10 m.....	44
<b>Foto</b>	<b>10:</b> Modelo del Aliviadero inicialmente instalado en el Laboratorio de Hidráulica, hasta el Modelo Físico Reducido...	47
<b>Foto</b>	<b>11:</b> Modelo del Aliviadero finalmente instalado en el Laboratorio de Hidráulica.....	47
<b>Foto</b>	<b>12:</b> Foto Instalación final en el Laboratorio del Modelo Físico Reducido (Pozo Amortiguador y aliviadero escalonado), Escala 1:15.....	48
<b>Foto</b>	<b>13:</b> Foto Instalación final en el Laboratorio del Modelo Físico Reducido (Tanque TIPO I y aliviadero escalonado), Escala 1:15.....	49
<b>Foto</b>	<b>14:</b> Foto Modelo Físico reducido Tanque TIPO III, Instalado en el Laboratorio, puesto en funcionamiento. Escala 1:15.....	49

## Índice de Fotos

		<b>Página</b>
<b>Foto</b>	<b>15:</b> Soportes de madera aumentando 7 centímetros al tanque de carga instalado.....	50
<b>Foto</b>	<b>16:</b> Dimensiones del tanque de carga que alimenta al sistema, para el funcionamiento del modelo físico reducido.....	51
<b>Foto</b>	<b>17:</b> Presa Escana, resumen de sus características.....	59
<b>Foto</b>	<b>18:</b> Tubo MS 1000 “WAFER”.....	63
<b>Foto</b>	<b>19:</b> Electrónica ML110.....	64
<b>Foto</b>	<b>20:</b> Cinta métrica colocada en el Pozo Amortiguador.....	67
<b>Foto</b>	<b>21:</b> Cinta métrica colocada en el Tanque TIPO I.....	67
<b>Foto</b>	<b>22:</b> Cinta métrica colocada en el Tanque TIPO III.....	68
<b>Foto</b>	<b>23:</b> Mangueras colocadas para medir la presión manométrica en cada punto de la línea central del Pozo Amortiguador.....	69
<b>Foto</b>	<b>24:</b> Mangueras colocadas para medir la presión manométrica en cada punto de la línea central del Tanque TIPO I.....	70
<b>Foto</b>	<b>25:</b> Mangueras colocadas para medir la presión manométrica en cada punto de la línea central del Tanque TIPO III.....	70
<b>Foto</b>	<b>26:</b> Datos amortiguadores en funcionamiento.....	94
<b>Foto</b>	<b>27:</b> Datos amortiguadores en funcionamiento vistos desde otra perspectiva.....	95
<b>Foto</b>	<b>28:</b> El vertedero en salto de esquí de la presa l’Aigle (cortesía de P. Danet, Ets. NEYRPIC).....	106

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1:</b> Fuerzas que intervienen en el movimiento, símbolos y equivalencias.....	21
<b>Cuadro 2:</b> Expresión de las magnitudes en función de la fuerza F, la longitud L y el tiempo T.....	25
<b>Cuadro 3:</b> Resumen de la determinación de los coeficientes desconocidos.....	26
<b>Cuadro 4:</b> Clasificación de los resaltos hidráulicos Modificado de Marbello (1997).....	41
<b>Cuadro 5:</b> Idealización del modelo.....	46
<b>Cuadro 6:</b> Pozo Amortiguador, eficiencia del salto y pérdida de energía.....	115
<b>Cuadro 7:</b> Estanque Tipo I, eficiencia del salto y pérdida de energía....	116
<b>Cuadro 8:</b> Estanque Tipo III, eficiencia del salto y pérdida de energía .....	116
<b>Cuadro 9:</b> Pozo Amortiguador, análisis de tirante inicial $y_1$ .....	117
<b>Cuadro 10:</b> Pozo Amortiguador, análisis de tirante final $y_2$ .....	117
<b>Cuadro 11:</b> Estanque Tipo I, análisis de tirante inicial $y_1$ .....	120
<b>Cuadro 12:</b> Estanque Tipo I, análisis de tirante final $y_2$ .....	120
<b>Cuadro 13:</b> Estanque Tipo III, análisis de tirante inicial $y_1$ .....	123
<b>Cuadro 14:</b> Estanque Tipo III, análisis de tirante final $y_2$ .....	124

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>ANEXO 1</b>	PLANOS
<b>ANEXO 2</b>	ANÁLISIS DE ESCALAS
<b>ANEXO 3</b>	RESUMEN DE MEDICIONES
<b>ANEXO 4</b>	MEDICIONES GRÁFICAS Y TABLAS
<b>ANEXO 5</b>	TEORÍA DE ERROR
<b>ANEXO 6</b>	CÁLCULO DE UN POZO AMORTIGUADOR
<b>ANEXO 7</b>	CÁLCULO DE UN ESTANQUE TIPO I
<b>ANEXO 8</b>	CÁLCULO DE UN ESTANQUE TIPO III
<b>ANEXO 9</b>	RESUMEN FOTOGRAFICO
<b>ANEXO 10</b>	SOPORTE DIGITAL DOCUMENTOS, VIDEOS Y FOTOS (DVD)