

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE
ALIVIADEROS TIPO WES Y PKW MEDIANTE CFD EN LA PRESA EL MOLINO**

Por:

QUISPE ORTIZ EDGAR RAUL

Proyecto de grado presentado a consideración de la UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
“JUAN MISAEL SARACHO” como requisito para optar el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II – 2025

TARIJA-BOLIVIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO DE INGENIERÍA CIVIL

MENCIÓN HIDRÁULICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE
ALIVIADEROS TIPO WES Y PKW MEDIANTE CFD EN LA PRESA EL MOLINO**

Por:

QUISPE ORTIZ EDGAR RAUL

SEMESTRE II – 2025

TARIJA-BOLIVIA

DEDICATORIA

A Dios, por ser guía en cada paso del camino y por darme la fortaleza en los momentos más difíciles.

A mis padres, Raúl Quispe y Elsa Ortiz por su paciencia y cariño.

A mis hermanos, Bryan, Fernando y Andrónico, como testimonio de que con esfuerzo y disciplina todo sueño puede hacerse realidad.

Con todo mi cariño les dedico este logro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	1
1.1	Introducción.....	2
1.2	Antecedentes.....	2
1.3	Planteamiento y formulación del problema.....	4
1.3.1	Descripción del problema.....	4
1.3.2	Planteamiento del problema.....	5
1.3.3	Formulación del problema.....	5
1.3.4	Sistematización del problema.....	5
1.4	Objetivo general y específicos.....	6
1.4.1	Objetivo general.....	6
1.4.2	Objetivos específicos.....	6
1.4.3	Análisis de variables.....	6
1.5	Justificación de la investigación.....	6
1.5.1	Justificación teórica.....	6
1.5.2	Justificación metodológica.....	7
1.5.3	Justificación práctica.....	7
1.6	Hipótesis.....	7
1.7	Marco de referencia.....	8
1.7.1	Marco teórico.....	8
1.7.2	Marco conceptual.....	9
1.7.3	Marco espacial.....	10
1.7.4	Marco temporal.....	12
1.8	Alcance del trabajo.....	12
1.8.1	Delimitación temática.....	12
2.	CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO.....	13
2.1	Mecánica de fluidos.....	14
2.2	Obras hidráulicas.....	14
2.3	Presas.....	14
2.3.1	La presa y sus estructuras auxiliares.....	14
2.3.2	Estudios y proyectos.....	15

2.3.3	Clasificación de las cortinas.	15
2.4	Obras de excedencia.	16
2.4.1	Avenida de diseño y capacidad del aliviadero.....	16
2.4.2	Tránsito de avenidas	17
2.5	Aliviadero.	17
2.5.1	Influencia de cada parte del aliviadero en la seguridad.....	18
2.5.2	Embocadura del aliviadero.	18
2.5.3	Tipología.....	18
2.6	Eficiencia hidráulica.	20
2.7	Hidráulica de vertederos.	20
2.8	Embocadura: Vertedero WES.....	22
2.8.1	Perfil hidrodinámico	23
2.8.2	Capacidad de descarga.....	24
2.9	Embocadura: Vertedero PKW.	26
2.9.1	Vertederos PKW implementados alrededor del mundo.	27
2.9.2	Tipos de vertederos PKW.....	28
2.9.3	Parámetros de un vertedero PKW.	31
2.9.4	Parámetros geométricos e hidráulicos óptimos para un PKW.	35
2.9.5	Diseño del PKW.	39
2.9.6	Ecuaciones analíticas de la capacidad de descarga de vertederos PKW.	40
2.9.7	Aireación del PKW.....	46
2.10	Enlace embocadura y conducción.....	49
2.11	Conducción.	49
2.12	Estructuras terminales - Restitución al cauce.	49
2.12.1	Cuencos amortiguadores.....	50
2.12.2	Cuencos complejos, dientes, deflectores.	51
2.12.3	Contrapendientes de salida.	53
2.13	Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).	53
2.14	Ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos computacional.....	54
2.14.1	Ecuación de conservación de masa (Continuidad).	54
2.14.2	Ecuaciones de cantidad de movimiento (Navier–Stokes).	54

2.15	Modelos de turbulencia.....	55
2.15.1	Aproximaciones numéricas para el tratamiento de la turbulencia.....	55
2.16	Flujos multifásico y superficie libre.	59
2.16.1	Enfoques para el modelado multifásico.....	60
2.17	Proceso de simulación CFD.....	61
2.18	Preproceso.....	62
2.18.1	Definición de la geometría: El dominio computacional.	62
2.18.2	Generación de la malla o división del dominio.	62
2.18.3	Identificación de los fenómenos físicos que pretenden modelarse.....	64
2.18.4	Definición de las propiedades del fluido (o fluidos).	64
2.18.5	Especificación de las condiciones iniciales y de contorno del problema.	64
2.19	Solver.	64
2.19.1	Ecuación general de transporte escalar: Discretización y solución.	65
2.19.2	Discretización.	66
2.19.3	Solver Basado en Presión.	66
2.19.4	Estabilidad numérica.	68
2.19.5	Convergencia.	69
2.20	Postproceso.	69
3.	CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	70
3.1	Datos Técnicos de la Presa El Molino	71
3.1.1	Topografía.	72
3.1.2	Curvas topográficas características.	73
3.1.3	Cuenca de aporte.	73
3.1.4	Tiempo de concentración.....	74
3.1.5	Caudales máximos.....	74
3.2	Caudales históricos.	75
3.3	Aliviadero presa El Molino.....	75
3.3.1	Embocadura.	76
3.3.2	Canal de conducción.....	77
3.3.3	Restitución al cauce.	78
3.4	Diseño, modelado y simulación del vertedero PKW.	79

3.4.1	Dimensiones vertedero PKW.	79
3.4.2	Modelado geométrico (SolidWorks).	79
3.4.3	Discretización espacial (mallado) (ANSYS Mesh).	81
3.4.4	Configuración de simulación.....	81
3.4.5	Solución.....	85
3.4.6	Análisis de estabilidad y convergencia.....	85
3.5	Resultados de simulación de vertederos PKW.	86
3.5.1	Carga hidráulica en vertederos PKW.	86
3.5.2	Velocidades en vertederos PKW.	87
3.5.3	Presiones en vertederos PKW.....	88
3.6	Curva de descarga de vertederos PKW.....	90
3.7	Análisis estadístico curva de descarga CFD vs ecuaciones empíricas.	90
3.7.1	Coeficiente de descarga PKW.	91
3.7.2	Coeficiente de descarga de vertederos WES y PKW.	92
3.8	Tránsito de avenidas con embocadura WES vs PKW.	93
3.9	Modelado y simulación de aliviaderos con embocaduras PKW y WES.	96
3.9.1	Dimensiones de aliviaderos.	96
3.9.2	Modelado geométrico (SolidWorks).	96
3.9.3	Discretización espacial (mallado) (ANSYS Mesh).	97
3.9.1	Configuración de simulación.....	97
3.9.2	Condiciones de frontera.....	98
3.9.1	Solución.....	100
3.9.2	Análisis de estabilidad y convergencia.....	101
3.10	Resultados de simulación de aliviadero con embocadura WES vs PKW.....	101
3.10.1	Transiciones.....	102
3.10.2	Conducción (rápidas).....	102
3.10.3	Disipación de energía (cuenco amortiguador).	106
4.	CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	107
4.1	Vertederos PKW.	108
4.1.1	Velocidades en vertederos PKW	108
4.1.2	Presiones en vertederos PKW.....	109

4.1.3	Carga hidráulica en vertederos PKW	110
4.1.4	Coeficiente de descarga en vertederos PKW	110
4.1.5	Reducción del coeficiente de descarga en vertederos PKW	111
4.1.6	Resalto hidráulico en vertederos PKW	112
4.1.7	Aireación en vertederos PKW	113
4.2	Análisis comparativo de vertederos WES y PKW	114
4.2.1	Velocidades en vertederos WES y PKW	114
4.2.2	Presiones en vertederos WES y PKW	115
4.2.3	Coeficiente de descarga en vertederos WES y PKW.	115
4.2.4	Carga hidráulica en vertederos WES y PKW	116
4.2.5	Ancho en vertederos WES y PKW	116
4.3	Tránsito de avenidas con embocaduras WES y PKW.	117
4.3.1	Eficiencia hidráulica y laminación.	117
4.3.2	Comportamiento hidráulico y niveles de agua.	117
4.3.3	Optimización de volúmenes de almacenamiento	118
4.3.4	Mejora en la seguridad estructural.....	118
4.4	Aliviaderos con embocaduras WES y PKW	118
4.4.1	Transiciones.....	118
4.4.2	Rápidas	120
4.4.3	Cuencos amortiguadores.....	121
4.4.4	Contrapendientes de salida	121
4.5	Justificación técnica de la implementación del vertedero PKW.....	122
4.5.1	Superior eficiencia hidráulica y capacidad de descarga.	122
4.5.2	Optimización del proceso de laminación y mayor seguridad.....	122
4.5.3	Control de cavitación.....	122
5.	CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	123
5.1	Conclusiones.	124
5.2	Recomendaciones.	128
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
7.	ANEXOS	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Coordenadas UTM del cierre de la presa El Molino	10
Tabla 2.1 Determinación de las avenidas de proyecto	16
Tabla 2.2 Clasificación de presas según categorías de riesgo	16
Tabla 2.3 Valores de K y n para distintas pendientes de la cara aguas arriba	23
Tabla 2.4 Coeficiente de contracción debido las pilas K_p	25
Tabla 2.5 Coeficiente de contracción debido a los estribos K_a	25
Tabla 2.6 Registro mundial de aliviaderos PKW	27
Tabla 2.7 Nomenclatura de los parámetros fundamentales de la geometría de PKW	34
Tabla 2.8 Nomenclatura de parámetros físicos	35
Tabla 2.9 Los anchos de las llaves de entrada y salida de 14 presas con PKW	37
Tabla 2.10 El grosor de pared de 14 vertederos PKW en presas.....	38
Tabla 2.11 Parámetros calidad de malla no estructurada	63
Tabla 3.1 Datos técnicos de la presa El Molino	71
Tabla 3.2. Topografía del embalse El Molino.	72
Tabla 3.3 Características generales de la cuenca de aporte	73
Tabla 3.4 Tiempo de concentración	74
Tabla 3.5 Estimación de crecidas	74
Tabla 3.6 Coordenadas del perfil hidrodinámico	76
Tabla 3.7 Dimensiones vertedero PKW Tipo A.....	79
Tabla 3.8 Dimensiones de aireadores para PKW	79
Tabla 3.9 Discretización espacial de vertederos.....	81
Tabla 3.10 Parámetros de calidad de mallado de vertederos.....	81
Tabla 3.11 Propiedades físicas de los materiales	82
Tabla 3.12 Caudales de simulación vertederos PKW-M1 y PKW-M2	83
Tabla 3.13 Rugosidades absolutas para simulación PKW	84
Tabla 3.14. Carga hidráulica vertederos PKW	86
Tabla 3.15 Velocidades en vertederos PKW	87
Tabla 3.16 Presiones absolutas mínimas en vertederos PKW	88
Tabla 3.17 Caudal y velocidad de aireadores en vertederos PKW	89
Tabla 3.18 Análisis estadístico ecuaciones vs CFD	91

Tabla 3.19 Desempeño en laminación T = 100 años.....	93
Tabla 3.20 Desempeño en laminación T = 500 años.....	94
Tabla 3.21 Desempeño en laminación T = 1000 años.....	95
Tabla 3.22. Discretización espacial de aliviaderos.....	97
Tabla 3.23. Parámetros de calidad de mallado de aliviaderos.....	97
Tabla 3.24 Propiedades físicas de los materiales	98
Tabla 3.25 Caudales de simulación para los aliviaderos	99
Tabla 3.26 Rugosidades absolutas.....	100
Tabla 3.27 Velocidad y calado en rápidas de aliviaderos, T = 100 años.....	103
Tabla 3.28 Velocidad y calado en rápidas de aliviaderos, T = 500 años.....	104
Tabla 3.29 Velocidad y calado en rápidas de aliviaderos, T = 1000 años.....	105
Tabla 3.30 Velocidad y tirantes conjugados en cuencos.	106
Tabla 3.31 Máxima altura de contrapendiente según Bretz	106
Tabla 4.1 Altura de rápida vs solicitada	120
Tabla 4.2 Análisis del contrapendiente de salida.	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Imagen satelital presa El Molino.....	11
Figura 1.2 Ubicación geográfica de la presa El Molino	11
Figura 2.1 Clasificación de las cortinas.....	15
Figura 2.2 Aliviadero en régimen libre	17
Figura 2.3 Embocadura recta, presa El Molino, Tarija-Bolivia	19
Figura 2.4 Embocadura de laberinto, presa Ute en New México.....	19
Figura 2.5 Embocadura laberinto tipo PKW, presa Malarce en Francia	19
Figura 2.6 Esquema para deducción de la fórmula de un vertedero.....	20
Figura 2.7 Elementos de un perfil estricto.....	22
Figura 2.8 Perfil U.S.B.R.	23
Figura 2.9 Coeficiente de descarga con pared vertical aguas arriba	24
Figura 2.10 Coeficientes de descarga distintas de la del proyecto	24
Figura 2.11 Vertedero PKW (Tecla de Piano)	26
Figura 2.12 Vertedero PKW bajo operación hidráulica	26
Figura 2.13 Modelos 3D vertedero PKW	28
Figura 2.14 Vertedero PKW de presa Goulours en Francia	29
Figura 2.15 Vertedero PKW de presa Charmines en Francia.....	29
Figura 2.16 Vertedero PKW de presa Saint-Marc en Francia.....	29
Figura 2.17 Vertedero PKW de presa Etroit en Francia.....	30
Figura 2.18 Vertedero PKW de presa Hazelmere en Sudáfrica	30
Figura 2.19 Ubicación de presas en todo el mundo equipadas con tecnología PKW	30
Figura 2.20 Componentes considerados y elementos básicos constitutivos	31
Figura 2.21 Vista en planta y 3D de una unidad PKW.....	31
Figura 2.22 Parámetros fundamentales de un PKW completo - vista 3D	32
Figura 2.23 Parámetros PKW – Vista transversal y vista en planta	32
Figura 2.24 Parámetro de la nariz - vista en 3D	33
Figura 2.25 Detalles de las secciones transversales de las crestas del PKW.....	33
Figura 2.26 Longitud de cresta desarrollada y secciones transversales típicas	33
Figura 2.27 Nomenclatura de los parámetros físicos	35
Figura 2.28 Dimensiones recomendadas PKW (ICOLD)	40

Figura 2.29 Red de aireación en Saint Marc (izquierda) y Goulours (derecha).....	47
Figura 2.30 Resumen de PKW con sistemas de aireación	48
Figura 2.31 Transiciones embocadura y conducción	49
Figura 2.32 Representación esquemática del resalto hidráulico.....	50
Figura 2.33 Cuenco USBR tipo II	51
Figura 2.34 Longitud de resalto, cuenco simple, tipo II y tipo III.....	52
Figura 2.35 Parámetros hidráulicos de un cuenco USBR tipo II.....	52
Figura 2.36 Superficie libre cuenco tipo II.....	52
Figura 2.37 Contrapendientes en cuencos	53
Figura 2.38 Volumen de control de flujo de un dominio computacional	54
Figura 2.39 Medición típica de la velocidad puntual en flujo turbulento.....	55
Figura 2.40 Modelo de turbulencia DNS.....	56
Figura 2.41 Modelo de turbulencia LES	56
Figura 2.42 Modelo de turbulencia RANS	57
Figura 2.43 Malla no estructurada y estructurada	63
Figura 3.1 Curvas Cota – Superficie del embalse El Molino	73
Figura 3.2 Curvas Cota – Volumen del embalse El Molino.....	73
Figura 3.3 Aliviadero durante una crecida y huellas históricas.....	75
Figura 3.4. Caudales históricos.....	75
Figura 3.5 Aliviadero de la presa El Molino	75
Figura 3.6 Vertedero WES de presa El Molino en época de lluvia y estiaje.....	76
Figura 3.7 Perfil hidrodinámico embocadura de aliviadero presa El Molino	77
Figura 3.8 Muro en transición	77
Figura 3.9 Rápida del aliviadero de la presa El Molino	78
Figura 3.10 Cuenco amortiguador de la presa El Molino.....	78
Figura 3.11 Dominio computacional vertedero PKW-M1	80
Figura 3.12 Dominio computacional de vertedero PKW-M2	80
Figura 3.13 Condiciones de frontera vertederos PKW-M1 y PKW-M2	83
Figura 3.14 Algoritmo de solución Piso	85
Figura 3.15 Carga hidráulica vertederos PKW-M1 y PKW-M2, Caudal 350 m ³ /s.....	86
Figura 3.16 Velocidades en vertederos PKW-M1 y PKW-M2, caudal 350 m ³ /s	87

Figura 3.17. Presiones en vertederos PKW-M1 y PKW-M2, caudal 350 m ³ /s.....	88
Figura 3.18 Aireación modelos PKW-M1 y PKW-M2, caudal 350 m ³ /s	89
Figura 3.19 Curva de descarga vertedero PKW	90
Figura 3.20 Coeficiente de descarga relacionado al ancho total W	91
Figura 3.21 Coeficiente de descarga relacionada a la longitud desarrollada L	92
Figura 3.22 Coeficiente de descarga relacionado al ancho del vertedero	92
Figura 3.23 Tránsito de avenidas para T = 100 años.....	93
Figura 3.24 Tránsito de avenidas para T = 500 años.....	94
Figura 3.25 Tránsito de avenidas para T = 1000 años.....	95
Figura 3.26 Aliviadero de presa El Molino con embocaduras WES y PKW	96
Figura 3.27 Condiciones de frontera de aliviadero con embocadura WES.....	98
Figura 3.28 Condiciones de frontera de aliviadero con embocadura PKW	99
Figura 3.29 Velocidades y calado en aliviadero WES, T = 500 años	101
Figura 3.30 Velocidades y calado en aliviadero PKW, T = 500 años.....	101
Figura 3.31 Velocidades y calado en transiciones para un T= 500 años.....	102
Figura 4.1 Vertederos PKW-M1 y PKW-M2.....	108
Figura 4.2 Velocidades en vertedero PKW	108
Figura 4.3 Presiones mínimas en modelos PKW	109
Figura 4.4 Carga hidráulica en vertederos PKW	110
Figura 4.5 Coeficiente de descarga relacionada a la longitud desarrollada L	110
Figura 4.6 Reducción del coeficiente de descarga en PKW	111
Figura 4.7 Resalto hidráulico en PKW, Q = 250 m ³ /s.....	112
Figura 4.8 Resalto hidráulico en PKW, Q = 300 m ³ /s.....	112
Figura 4.9 Resalto hidráulico en PKW, Q = 350 m ³ /s.....	112
Figura 4.10 Resalto hidráulico en PKW, Q = 400 m ³ /s.....	113
Figura 4.11 Relación del flujo de aire al flujo de agua en PKW	114
Figura 4.12 C _d relacionado a longitud de cresta y ancho de vertedero	115
Figura 4.13 Curva de descarga vertederos WES y PKW	116
Figura 4.14 Reducción de ancho con un vertedero PKW.....	116
Figura 4.15 Velocidades y calado en transición WES - rápida, T= 500 años	119
Figura 4.16 Velocidades y calado en transición PKW - Rápida, T = 500 años	119

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Gestión de información técnica de la presa El Molino.

Anexo 2 Diseño de vertedero PKW y modelos geométricos SolidWorks.

Anexo 3 Resultados de simulación de vertederos PKW-M1 y PKW-M2

Anexo 4 Análisis de resultados de la simulación de vertederos PKW-M1 y PKW-M2

Anexo 5 Tránsito de avenidas con embocaduras WES y PKW.

Anexo 6 Resultados de simulación de aliviaderos con embocaduras WES y PKW

Anexo 7 Análisis de resultados de simulación y cálculos hidráulicos de aliviaderos.