

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS CIVILES**

**TEMA:
EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE
EXCESOS DEL TANQUE DE CARGA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
PALMIRA-NANEGAL UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS CFX**

**AUTORES:
LEONARDO GIGOTH CHÁVEZ LOOR
DIEGO PAÚL DUEÑAS CHERRES**

**TUTOR:
FREDDY ISRAEL RODRÍGUEZ BADILLO**

Quito, julio del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Leonardo Gigoth Chávez Loor y Diego Paúl Dueñas Cherras, con documentos de identificación N° 2100407390 y N° 1600452765 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE EXCESOS DEL TANQUE DE CARGA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PALMIRA-NANEGAL UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS CFX, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Civiles, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, julio del 2021



Chávez Loor Leonardo Gigoth
Ci: 2100407390




Dueñas Cherras Diego Paúl
Ci: 1600452765

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto técnico, con el tema: EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LAS OBRAS DE EXCESOS DEL TANQUE DE CARGA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PALMIRA-NANEGAL UTILIZANDO EL SOFTWARE ANSYS CFX, realizado por Leonardo Gigoth Chávez Loor y Diego Paúl Dueñas Cherres, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2021

A handwritten signature in blue ink, reading "Freddy Rodríguez Badillo", is written over a horizontal line.

Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo MSc

1720094026

DEDICATORIA

A mi madre Mayra, por todo su amor, por enseñarme que los valores y principios son los que nos definen como buenos seres humanos, por darme todo su apoyo incondicional e impulsarme a nunca dejarme vencer, y así, afrontar cualquier obstáculo que se presente en la vida.

A mi esposa Eugenia, por ser mi amiga, mi compañera de lucha y por siempre estar a mi lado, en los momentos más difíciles.

A mi hija Amy, por ser mi inspiración y el motor que impulsa a esforzarme con el pasar de los días.

A mis hermanos Johan y Fernando, por siempre estar allí para escucharme y brindarme un consejo cuando más lo he necesitado.

A mi sobrina Esther, por ser la luz de toda mi familia en estos tiempos difíciles.

Diego Paúl Dueñas Cherres

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico esta victoria a dios, por llenar de bendiciones mi camino y por brindarme la fuerza para seguir adelante ante todas las adversidades.

A mi madre, María Dolores Loor, por todo el amor infinito, cariño y paciencia que me demuestra día con día, por apoyar todas mis decisiones, por estar a mi lado en cada paso y levantarme después de cada tropiezo, y por inculcarme buenos valores espirituales y personales.

A mi padre, Wilman Chávez Peña, por todo el amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida y de mi carrera estudiantil, por tantos sacrificios, por sus consejos e inculcarme de buenos valores, por ser un pilar fundamental en el desarrollo de mi carácter y personalidad y por no perder la fe en mí.

Leonardo Gigoth Chávez Loor

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Politécnica Salesiana por educarnos como buenos profesionales y excelentes seres humanos, a la carrera de Ingeniería Civil por brindarnos las herramientas fundamentales para superar futuros desafíos.

A nuestro tutor, Freddy Rodríguez, a quien tenemos profundo respeto, admiración y aprecio, por su guía, paciencia y dedicación, y por ser un docente ejemplar e inculcarnos los conocimientos para culminar con éxito el presente proyecto de titulación.

Chávez & Dueñas

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Justificación.....	2
1.4. Alcance.....	4
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo general.....	4
1.5.2. Objetivos específicos.	4

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PALMIRA-NANEGAL	6
2.1. Aspectos generales de la central.....	6
2.2. Descripción de las obras hidráulicas	7
2.2.1. Obras de Captación.	7
2.2.2. Obra de conducción.....	9
2.2.3. Tanque de carga.	11
2.2.4. Tubería a presión.....	12
2.2.5. Casa de máquinas.....	14
2.2.6. Subestación eléctrica.	15
2.2.7. Obras de excesos del tanque de carga.	16
2.3. Información base para el estudio.....	22

CAPÍTULO III

BASE TEÓRICA PARA LA EVALUACIÓN, DISEÑO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS OBRAS DE EXCESOS.....	24
3.1. Fundamentos de la mecánica de fluidos tradicional.....	24
3.1.1. Vertedero.....	24
3.1.2. Canal de recolección.	27
3.1.3. Canal de conducción de excesos.	32

3.1.4. Rápida de excesos.	38
3.1.5. Obras de disipación.	53
3.2. Simulación numérica con dinámica de fluidos computacional (CFD)	55
3.2.1. ANSYS Workbench.	57
3.2.2. ANSYS CFX.	57
3.2.3. Ecuación general de la conservación.	58
3.2.4. Discretización espacial.	63
3.2.5. Método de volúmenes finitos. –	64
3.2.6. Modelos de turbulencia.	65
3.2.7. Etapas de la modelación numérica.	67

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN HIDRÁULICAS DE LAS OBRAS DE EXCESOS EXISTENTES	71
4.1. Evaluación de la capacidad del vertedero de excesos	71
4.1.1. Tipo de vertedero.	72
4.2. Análisis del flujo espacialmente variado en el canal de recolección	74
4.2.1. Perfil de flujo espacialmente variado.	74
4.3. Análisis del flujo gradualmente variado en el canal de conducción	81
4.3.1. Perfil de la superficie libre del flujo en el canal de conducción.	83
4.4. Flujo gradualmente variado en la rápida de excesos.....	86
4.4.1. Perfil de flujo de la rápida circular lisa sin introducción de aire.	89
4.4.2. Flujo con introducción de aire.....	93

CAPÍTULO V

DISEÑO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.....	98
5.1. Pre diseño geométrico de la rápida escalonada. –	98
5.1.1. Flujo rasante, con introducción de aire. –	100

CAPÍTULO VI

DISEÑO DE LA RÁPIDA LISA CON ELEMENTOS DISIPADORES.....	104
6.1. Análisis de los regímenes de flujo.....	108

6.2. Análisis de la disipación de energía	109
6.3. Estructura de disipación en el cauce	110
6.4. Análisis del enrocado.	111

CAPÍTULO VII

SIMULACIÓN NUMÉRICA CON ANSYS CFX

7.1. Generación de la geometría.....	112
7.2. Generación del dominio y mallado de la estructura hidráulica.....	116
7.2.1. Dominio del fluido	116
7.3. Generación del mallado en el sistema hidráulico.....	117
7.4. Condiciones de borde	121
7.5. Solución Numérica.....	123
7.6. Análisis del funcionamiento hidráulico de las obras de disipación de energía.....	128
7.6.1. Evaluación del vertedero de excesos en CFD.	129
7.6.2. Canal de recolección	133
7.6.3. Canal de conducción	138
7.6.4. Modelación de la rápida con tubo liso existente	140
7.6.5. Modelación de la rápida escalonada	144
7.6.6. Modelación de la rápida con anillos disipadores	148
7.6.7. Comparación de los resultados del diseño analítico con el modelo numérico.	153

CAPÍTULO VIII

EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.

8.1. Aspectos importantes del diseño hidráulico de las alternativas.	157
8.1.1. Aspectos importantes de la comprobación y diseño analítico. –	157
8.1.2. Aspectos importantes de la modelación numérica–	159
8.2. Comparación y validación de las alternativas.	159
8.2.1. Eficiencia de disipación en alternativas del diseño analítico.	160
8.2.2. Eficiencia de disipación en alternativas de los modelos numéricos	161
8.3. Selección de la alternativa óptima desde el punto de vista técnico-económico.....	162

8.3.1. Presupuesto de la rápida escalonada.	163
8.3.2. Presupuesto de la rápida con anillos	164
CONCLUSIONES	165
RECOMENDACIONES	167
REFERENCIAS	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos del vertedero de excesos.	72
Tabla 2. Determinación de los parámetros hidráulicos del vertedero de excesos.....	72
Tabla 3. Cálculo de las profundidades críticas.....	75
Tabla 4. Cálculo para la determinación de la sección de control.....	75
Tabla 5. Calculo para la determinación del perfil de flujo.....	78
Tabla 6. Determinación de los parámetros del resalto hidráulico.	82
Tabla 7. Cálculos para la construcción de la curva de superficie libre por el método de Charnosky.....	83
Tabla 8. Determinación de los parámetros de la rápida lisa.....	88
Tabla 9. Cálculos para la determinación del perfil de flujo de la rápida lisa circular sin introducción de aire.....	89
Tabla 10. Datos para el cálculo del perfil de flujo con aireación.....	93
Tabla 11. Parámetros hidráulicos para el perfil de flujo con aireación.....	94
Tabla 12. Datos para el prediseño del perfil escalonado con flujo rasante.	99
Tabla 13. Prediseño del perfil escalonado.....	99
Tabla 14. Parámetros del punto de inepción.	100
Tabla 15. Disipación de energía del perfil escalonado.....	101
Tabla 16. Datos recopilados de los planos As-built.....	105
Tabla 17. Resumen de los parámetros calculados.....	107
Tabla 18. Disipación de energía al pie de la rápida.	109
Tabla 19. Diámetro equivalente de la roca.....	111

Tabla 20. Número de elementos del mallado de las obras en estudio.....	117
Tabla 21. Parámetros hidráulicos del vertedero.	133
Tabla 22. Parámetros del canal de recolección	136
Tabla 23. Parámetros de la sobre elevación	137
Tabla 24. Parámetros del canal de conducción de excesos	140
Tabla 25. Resultados al fondo de la rápida circular lisa.....	143
Tabla 26. Resultados al fondo de la rápida escalonada con flujo rasante	148
Tabla 27. Resultados al fondo de la rápida con elementos disipadores	152
Tabla 28. Resultados comparativos del vertedero del tanque de carga.....	153
Tabla 29. Resultados comparativos del canal de recolección.	153
Tabla 30. Resultados comparativos del salto negativo	154
Tabla 31. Resultados comparativos de la sobre elevación	154
Tabla 32. Resultados comparativos del canal de conducción de excesos.	155
Tabla 33. Resultados comparativos de la rápida con tubo liso	155
Tabla 34. Resultados comparativos de la rápida escalonada.	155
Tabla 35. Resultados comparativos de la rápida con anillos disipadores.	156
Tabla 36. Tabla de velocidades del diseño analítico.	160
Tabla 37. Tabla de disipación del diseño analítico.	161
Tabla 38. Resultados de los tres modelos numéricos.....	161
Tabla 39. Presupuesto referencial para la elaboración de la rápida escalonada.	163
Tabla 40. Presupuesto referencia para la implantación de los anillos disipadores.	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de los componentes de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal	7
Figura 2. Funcionamiento y componentes de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal	8
Figura 3. Obras de captación de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal.....	9
Figura 4. Canal trapezoidal en su proceso constructivo	10
Figura 5. Canal de conducción en operación	10
Figura 6. Tanque de carga de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal	11
Figura 7. Tanque de carga y vertedero de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal	12
Figura 8. Tubería a presión, Bifurcación de la tubería de acero a presión	13
Figura 9. Perfil longitudinal de la tubería a presión de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal.....	13
Figura 10. Válvulas mariposa, turbinas Francis, generadores síncronos, transformador de servicio, switchegear y sala de control, respectivamente	14
Figura 11. Subestación de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal	15
Figura 12. Corte transversal tanque de carga, (visualización dimensiones del vertedero)	17
Figura 13. Geometría del canal de conducción de excesos (Corte transversal), fotografía canal aguas arriba.....	18
Figura 14. Rápida lisa con sus respectivos anclajes	20
Figura 15. Estructura de disipación existente	21
Figura 16. Estructura de disipación con sus respectivas distancias.	22
Figura 17. Clasificación de vertederos según Sotelo, 1997.	24
Figura 18. Relación entre $F1$ y $y2/y1$ para el resalto	30
Figura 19. Tipos de perfiles para flujo gradualmente variado.	36
Figura 20. Esquema de la sobrelevación.....	37
Figura 21. Parámetros de una sección circular.	39
Figura 22. Gráfico de intersección de capa limite y flujo desarrollado.	41
Figura 23. Elementos de una rápida escalonada	42
Figura 24. Tipos de flujo en la rápida escalonada	43
Figura 25. Detalle de un flujo rasante con sus diferentes tipos de zonas.....	44

Figura 26. Tipos de flujo rasante	45
Figura 27. Gráfico para el flujo en un sistema circular.....	49
Figura 28. Regímenes de flujo según Morris 1963.....	50
Figura 29. Gráfico para determinar el tamaño del enrocado de protección.....	55
Figura 30. Representación de un dominio discretizado con el método de volúmenes finitos	64
Figura 31. Nodos y volúmenes de control. Izquierda MEF. Derecha MVF.....	65
Figura 32. Algoritmo de las etapas de la modelación numérica	70
Figura 33. Corte del vertedero de excesos del tanque de carga	71
Figura 34. Esquema del vertedero de excesos del tanque de carga.	73
Figura 35. Perfil de corte del canal de recolección.	74
Figura 36. Curva de profundidades críticas y fondo del canal	76
Figura 37. Perfil de flujo del canal de recolección con flujo espacialmente variado	81
Figura 38. Esquema del canal con flujo espacialmente variado	82
Figura 39. Curva de remanso para el flujo gradualmente variado del canal de excesos.	85
Figura 40. Esquema de sobreelevación en la curva del canal.....	86
Figura 41. Corte longitudinal de la rápida circular lisa.	87
Figura 42. Perfil de flujo de la rápida lisa.....	92
Figura 43. Perfiles de flujo con introducción y sin introducción de aire.....	96
Figura 44. Esquema del perfil escalonado.	102
Figura 45. Esquema de una rápida anillada y su funcionamiento.....	104
Figura 46. Diseño del anillo de disipación.....	106
Figura 47. Diseño preliminar de la distribución de los anillos en rápida de fondo liso.....	106
Figura 48. Esquema del perfil con el régimen calculado.....	108
Figura 49. Estructura de disipación propuesta por la C.E.M.	110
Figura 50. Esquema de las herramientas del Ansys CFX,	112
Figura 51. Vista en 3D de las obras actuales (rápida de tubo liso).....	113
Figura 52. Vistas de la Geometría creada en Space Claim para la rápida de tubo lisa y anillada.	114
Figura 53. Vista en 3D de del diseño de rápida escalonada,.....	115
Figura 54. Vistas de la Geometría creada para la rápida escalonada en Space Claim.....	115

Figura 55. Ilustración de los dominios que intervienen en las obras de excesos.....	116
Figura 56. Mallado total en el modelado numérico para la rápida de tubo liso.....	118
Figura 57. Mallado total en el modelado numérico para la rápida escalonada.	118
Figura 58. Mallado total en el modelado numérico para la rápida con anillos disipadores.	119
Figura 59. Mallado en el tanque de carga, y canales de recolección y conducción.....	119
Figura 60. Mallado en la rápida circular lisa y cuenco de disipación.	120
Figura 61. Mallado del volumen del fluido en la rápida escalonada y cuenco de disipación.	120
Figura 62. Mallado del volumen del fluido en la rápida lisa con anillos y cuenco de disipación.....	121
Figura 63. Describe las condiciones de borde aplicadas en la rápida con tubo liso usando el módulo Setup en Ansys CFX,.....	123
Figura 64. Valores residuales del Volumen y Caudal Másico,.....	124
Figura 65. Valores residuales de la disipación turbulenta,	125
Figura 66. Valores residuales para la Fracción Volumétrica,.....	126
Figura 67. Resumen de los valores mínimos y máximos,.....	127
Figura 68. Resumen de los valores promediados.....	128
Figura 69. Paso de agua del tanque al canal de recolección,	129
Figura 70. Líneas de flujo.	130
Figura 71. Fracción fluida a 1m del ingreso.	131
Figura 72. Fracción fluida a 30m del ingreso,	131
Figura 73. Fracción fluida a 30m del ingreso,	132
Figura 74. Diagrama de velocidades a 3m del ingreso,	132
Figura 75. Corte transversal del canal de recolección.	134
Figura 76. Vista en 3D del canal de recolección.	134
Figura 77. Perfil de flujo del canal de recolección.	135
Figura 78. Perfil de flujo y sus parámetros del canal de recolección.	135
Figura 79. Curva antes del canal de conducción.....	137
Figura 80. Corte trasversal del canal de conducción de excesos a 15m iniciado el canal. ..	138
Figura 81. Perfil de flujo del canal de conducción de excesos.	139

Figura 82. Perfil de flujo y sus parámetros del canal de conducción excesos antes del ingreso a la rápida.....	139
Figura 83. Vista en 3D de la rápida de excesos.	140
Figura 84. Corte transversal de la rápida lisa.....	141
Figura 85. Perfil de flujo de la rápida lisa, Corte transversal.	142
Figura 86. Perfil de flujo de la rápida lisa, Corte transversal.	142
Figura 87. Perfil de velocidades de la rápida lisa.	143
Figura 88. Corte frontal de la rápida escalonada a 11m.	144
Figura 89. Vista en 3D de la rápida escalonada.....	145
Figura 90. Perfil transversal de la rápida escalonada.....	146
Figura 91. Perfil transversal de la rápida escalonada a la salida.....	146
Figura 92. Perfil de velocidades en toda la rápida escalonada.	147
Figura 93. Modelo 3D de la rápida con anillos disipadores.	148
Figura 94. Corte frontal de la rápida anillada.	149
Figura 95. Corte longitudinal rápida con anillos disipadores.	150
Figura 96. Corte longitudinal rápida con anillos disipadores a la salida.	151
Figura 97. Perfil de velocidades rápida anillos disipadores a la salida.....	152

RESUMEN

El presente proyecto de titulación denominado: Evaluación y optimización hidráulica de las obras de excesos del tanque de carga de la central hidroeléctrica Palmira-nanegal utilizando el software ANSYS CFX, como su nombre lo indica, tiene como propósito realizar la evaluación analítica de las obras de excesos que se encuentran actualmente construidas en la central hidroeléctrica y posteriormente validar los resultados por medio de modelos numéricos, utilizando el programa ANSYS CFX, el cual permite solucionar las ecuaciones generales de la mecánica de fluidos a través de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional por sus siglas en inglés).

Adicionalmente, de manera organizada y concisa, se plantea alternativas de las obras hidráulicas con el objetivo de mejorar el diseño de la rápida con tubo liso actualmente construida, para que cumpla con un funcionamiento adecuado. La evaluación se la realiza considerando la modelación numérica del flujo bifásico auto aireado que desciende por las alternativas planteadas (rápidas).

La validación de resultados se presenta a través de una serie de datos (velocidades, presiones, disipación de energía, etc.), además de un análisis técnico- económico para cada una de las alternativas.

Palabras clave: Simulación, Ansys CFX, disipación, excesos, hidráulica.

ABSTRACT

The present degree project called: Evaluation and hydraulic optimization of the overflow works of the loading tank of the Palmira-nanegal hydroelectric power plant using ANSYS CFX software, as its name indicates, The purpose of this project is to perform the analytical evaluation of the overflow works currently built in the hydroelectric power plant and subsequently validate the results by means of numerical models, using the ANSYS CFX program, which allows solving the general equations of fluid mechanics through CFD (Computational Fluid Dynamics).

Additionally, in an organized and concise manner, alternatives of the hydraulic works are proposed with the objective of improving the design of the currently constructed smooth pipe rapid, so that it complies with an adequate operation. The evaluation is carried out considering the numerical modeling of the self-aerated two-phase flow that descends through the proposed alternatives (rapids).

The validation of results is presented through a series of data (velocities, pressures, energy dissipation, etc.), in addition to a technical-economic analysis for each of the alternatives.

Keywords: Simulation, Ansys CFX, dissipation, excesses, hydraulics.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1. Introducción

El presente proyecto tiene como objetivo principal la evaluación y optimización hidráulica de la rápida de excesos en el tanque de carga de la Central Hidroeléctrica Palmira-Nanegal, usando como una herramienta de diseño el software ANSYS CFX. Este software permite solucionar las ecuaciones generales de la mecánica de fluidos a través de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional por sus siglas en inglés).

El tema a desarrollar consiste en evaluar el sistema de las obras de excesos que se encuentran actualmente construidas, además de manera organizada y concisa, aportar con alternativas de las obras hidráulicas que permitan un funcionamiento adecuado, ya que actualmente la obra construida presenta ciertos problemas. Adicionalmente se realizará un análisis técnico-económico para cada una de las alternativas.

El presente trabajo considera la modelación numérica del flujo bifásico auto aireado que desciende por las rápidas (alternativas planteadas) transportando un caudal establecido. Para ello, los resultados se presentarán a través de una serie de datos (velocidades, presiones, disipación de energía, etc.).

1.2. Antecedentes

La central hidroeléctrica según el gobierno provincial de Pichincha se encuentra operativa desde el año 2017, la misma que ha tenido un aprovechamiento hidroeléctrico del caudal afluente sobre el río Alambi en la provincia de Pichincha, cantón Quito, parroquia Nanegal, sus aguas permiten generar energía limpia, que abastece a la parte noroccidental de la provincia y del País,

cabe recalcar que la energía generada es amigable con el ambiente, no genera daño a la naturaleza. La central hidroeléctrica está bajo la supervisión de la empresa de economía mixta Palmira Nanegal – CEM IPNEGAL.

La central hidroeléctrica cuenta con las principales obras: Azud, bocatoma lateral, cámara desripadora, desarenador de dos cámaras, canal de aducción con sección auto portante y sección trapezoidal, además cuenta con un tanque de carga con vertedero lateral y aliviadero de excedencias, tubería forzada hasta la casa de máquinas equipada con 2 turbinas Francis de eje horizontal (10 Mw). (Ayesa, 2018)

El análisis de este proyecto de titulación se enfocará en el vertedero, canal y rápida que conduce el agua de excesos del tanque de carga hacia una quebrada existente. Como rápida actualmente cuenta con una tubería lisa de acero de 2000 mm de diámetro, la misma que desaloja el caudal excedente.

1.3. Justificación

Una de las problemáticas de la obra construida, en la que se debe hacer énfasis, es la pendiente topográfica, tiene un aproximado del 50%, según Chanson (2004) se toma como referencia que las rápidas de fondo liso deben tener un rango entre el 10% y 25%.

En consecuencia, esto ocasionará altas velocidades en la tubería, generando problemas en el tubo, la salida de la rápida y el fondo del cauce. Considerando que se cuenta con una tubería de acero, y esta es susceptible a la erosión generada por las altas velocidades provocadas por la transformación de la energía potencial a energía cinética, y adicionalmente con el paso del tiempo se podría generar problemas de socavación sobre el fondo de la quebrada y socavación regresiva sobre la ladera donde se asienta la tubería, el actual sistema construido es susceptible a una optimización.

En la obra de disipación que funciona actualmente, existen bloques de roca embebidos en el fondo y un bloque de hormigón al frente. Se considera que no es recomendable, que el sistema siga trabajando con las actuales condiciones de funcionamiento de las obras de excesos, específicamente lo concerniente a la disipación de energía y entrega del agua sobre la quebrada.

Con la problemática anteriormente establecida, es necesario plantear alternativas de diseño y rediseño de las obras de excesos del tanque de carga que brinden una solución y garanticen una adecuada disipación de energía correspondiente al caudal de diseño, para que lleguen a su cauce natural, sin que existan afectaciones en todo el trayecto de la rápida y sobre el lecho que recibirá el agua.

Para ello, aparte de evaluar el funcionamiento de la actual rápida con tubo liso se proponen dos alternativas para mejorar los estándares de funcionamiento hidráulico. Se analizará la rápida lisa, verificando los parámetros permisibles para un adecuado descenso del agua, considerando un flujo bifásico auto aireado.

Una de las alternativas es analizar y diseñar una rápida escalonada, la que presentaría un mayor porcentaje de disipación de energía en comparación con el sistema actual, debido a los escalones que generan pérdidas de energía cinética al descender el flujo.

Otra alternativa que se propone es el uso de anillos disipadores al interior de la tubería de la obra existente. Al usar elementos que actúan como “rugosidad” artificial para aumentar la resistencia al flujo y la turbulencia en el movimiento, se logra inducir a la reducción de la energía cinética y por lo tanto la reducción de la velocidad del flujo.

1.4. Alcance

La empresa que se encuentra dirigiendo la Central Hidroeléctrica, es la beneficiaria directa de este proyecto, si deciden adoptar una de las posibles soluciones planteadas, ya que, mejorará el funcionamiento operacional de las obras de excesos del tanque de carga.

Serán beneficiarios los profesionales y estudiantes de ingeniería civil, que presenten interés en el campo hidráulico a través de programas (CFD), para aplicarlos en estudios de diseño definitivo de obras de disipación de energía. Además de la posible inclusión de anillos disipadores como estructura de reducción de energía.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general.

Evaluar y optimizar el funcionamiento hidráulico de la rápida de excesos del tanque de carga de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal, proponiendo diferentes alternativas al problema, utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), a través del software especializado ANSYS CFX.

1.5.2. Objetivos específicos.

- Recopilar la información hidráulica y topográfica, necesaria para la elaboración del proyecto.
- Evaluar el sistema hidráulico de la rápida con tubo liso correspondiente a los excesos del tanque de carga existente, de forma analítica y su comprobación en ANSYS CFX.
- Proponer una alternativa de diseño usando una rápida escalonada como posible solución al problema.

- Rediseñar y analizar el uso de anillos disipadores de energía al interior de la tubería existente como posible solución.
- Recomendar una estructura de disipación complementaria en el sitio de descarga sobre el cauce.
- Realizar las simulaciones y modelos matemáticos utilizando ANSYS CFX para las alternativas propuestas.
- Analizar resultados y recomendar la alternativa más idónea desde el punto de vista técnico-económico.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

PALMIRA-NANEGAL

2.1. Aspectos generales de la central

La central hidroeléctrica Palmira-Nanegal es uno de los proyectos hidroeléctricos realizados por el Gobierno de Pichincha, la cual contribuye a la generación de energía eléctrica para el país. Este proyecto estuvo a cargo de la constructora nacional S.A. y conjuntamente con la fiscalización de Hidroequinoccio EP.

La central hidroeléctrica fue inaugurada y se encuentra operativa desde el 19 de diciembre de 2017, generando un aprovechamiento del caudal afluente sobre el Rio Alambi de 10 MW por hora. Este caudal permite en su funcionamiento la transformación de energía potencial a energía cinética, posteriormente transforma a energía mecánica y finalmente genera energía hidroeléctrica amigable con el ambiente, que abastece a la parte noroccidental de la provincia y del país.

Este proyecto está ubicado en la parroquia Nanegal, en la zona noroccidental del distrito metropolitano de Quito en el sector conocido como hacienda palmira, el sector registra una población de 2560 habitantes la misma que representa el 0.3% de la población total de Quito.

La captación de agua inicia desde el rio Alambi, que nace en las faldas del Pichincha, recorre la zona de intervención Nanegal y se une a Guayllabamba, gracias a sus aguas permiten generar energía limpia.

La central cuenta con las principales obras: Azud, bocatoma lateral, cámara desripadora, desarenador de dos cámaras, canal de conducción con sección auto portante y sección trapezoidal, además cuenta con un tanque de carga con vertedero lateral y aliviadero de excedencias, tubería

forzada hasta la casa de máquinas equipada con 2 turbinas Francis de eje horizontal (10 Mw). (Ayesa, 2018).

A continuación, se presenta un esquema en el cual se aprecia de manera general los componentes de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal.

Figura 1.

Esquema de los componentes de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal



Nota. Se observa la captación en el río Alambi hasta la casa de máquinas. Fuente: Hidroequinoccio EP

2.2. Descripción de las obras hidráulicas

2.2.1. Obras de Captación.

La capacidad de captación de la central hidroeléctrica es de 13 m³/s, dentro de las obras de captación de la central se tiene un Azud de 3.5 metros de altura, bocatoma con cuatro rejillas laterales, además se dispone de una cámara desripadora que se ocupa de retener arenas y ripios,

desarenador que impide el paso de partículas inferiores o iguales a 0.4 mm de diámetro, transición y obras de limpieza.

Figura 2.

Funcionamiento y componentes de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal



Nota. Se observa el detalle en planta de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal. *Fuente:*

Hidroequinoccio EP

Figura 3.

Obras de captación de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal



Nota. Se observa la captación del río y el ingreso a la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal.

Fuente: Hidroequinoccio EP

2.2.2. Obra de conducción.

En las obras de conducción se cuenta con un canal de hormigón armado de 3548 m de longitud, cuya función es conducir el flujo de agua desde las obras de captación hacia el tanque de carga, la geometría del canal tiene la siguiente disposición: el inicio del canal es de sección rectangular y mide aproximadamente un kilómetro de distancia, luego existe una transición de canal rectangular a trapezoidal del mismo material y finalmente un canal trapezoidal de aproximadamente dos y medio kilómetros de distancia.

A continuación, se visualiza la sección del canal con la geometría trapezoidal en su proceso de construcción y con sección rectangular en su funcionamiento.

Figura 4.

Canal trapezoidal en su proceso constructivo



Nota. La figura muestra la construcción del canal de conducción. Fuente: CEM Palmira-Nanegal

Figura 5.

Canal de conducción en operación



Nota. Se observa cómo el canal transporta el caudal del río. Fuente: CEM Palmira-Nanegal

2.2.3. Tanque de carga.

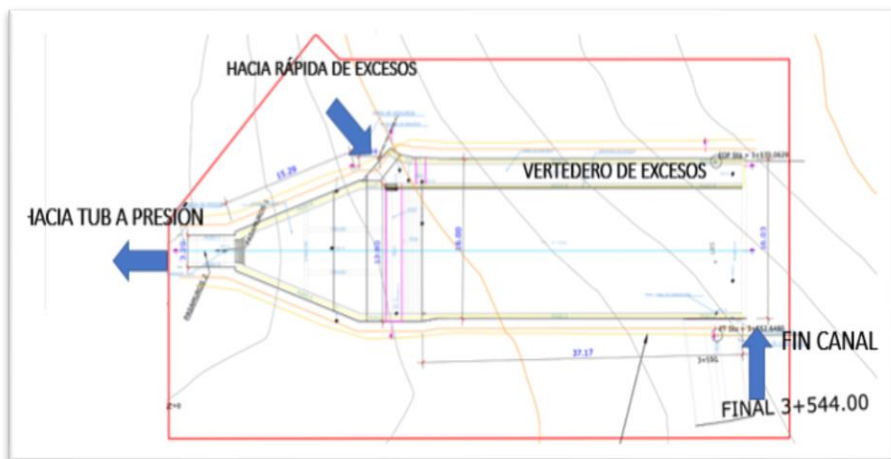
Otro de los componentes de la central es el tanque de carga, en el cual se dispone de un volumen aproximado de 2058 m³, está construido con hormigón armado, en una de sus paredes laterales dispone la entrada del canal de conducción de sección trapezoidal con flujo a superficie libre, ya que es la sección en la cual el canal entrega el caudal directamente al tanque de carga.

Dentro del tanque, en su parte frontal tiene 3 rejillas a la entrada de la cámara de transición, posteriormente una compuerta a la entrada de la tubería de presión y una compuerta que sirve para limpieza y lavado de sedimentos.

En su costado derecho tiene una pared cuya geometría funciona como vertedero de excesos, está construida de hormigón armado cuyas dimensiones son: 36.1 m de longitud, 0,5 m de espesor y una altura de 3.47 m, el cual le permite entregar el caudal a un canal de conducción, el mismo que es uno de los componentes de las obras de excesos. Cabe acotar que en la parte frontal del tanque de carga se origina el inicio de una tubería a presión que se dirige hacia la casa de máquinas y las obras de limpieza correspondientes.

Figura 6.

Tanque de carga de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal



Nota. Vista en planta de las obras hidráulicas. Fuente: Planos As Built CEM Palmira-Nanegal

Figura 7.

Tanque de carga y vertedero de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal



Nota. Se observa cómo el agua excedente cae al vertedero. Fuente: CEM Palmira-Nanegal

2.2.4. Tubería a presión.

Se encuentra ubicada entre el tanque de carga y el bifurcador, en la entrada de la casa de máquinas, el mismo que se encarga de transportar el caudal entre las obras antes mencionadas, la tubería es de acero, de diámetro 2.2 y 2 m respectivamente, además la longitud de la tubería es de 265 m y 70 m respectivamente.

La tubería termina en una bifurcación de acero que se encarga de dividir el caudal mediante dos ramales para cada turbina, los dos ramales son tubos de acero de 1.20 m de diámetro que se conectan a las válvulas mariposa en la Casa de Máquinas.

Figura 8.

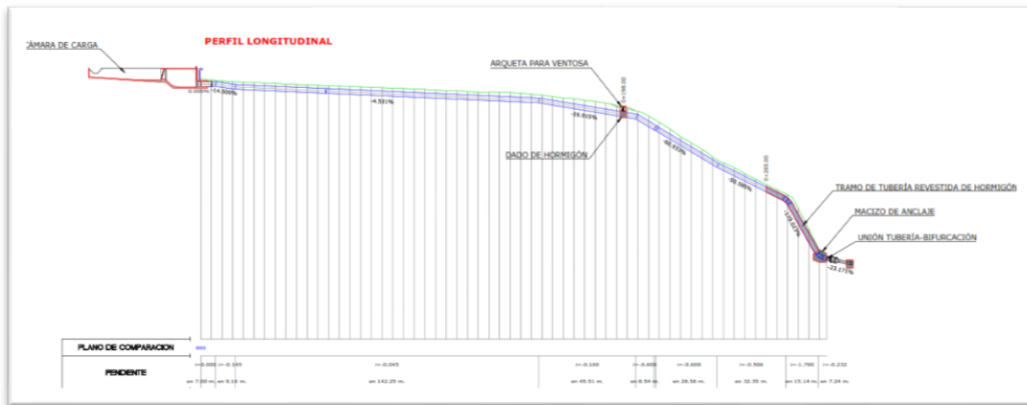
Tubería a presión, Bifurcación de la tubería de acero a presión



Nota. Se puede observar la tubería a presión con la que se abastece a la casa de máquinas. Fuente: CEM Palmira-Nanegal

Figura 9.

Perfil longitudinal de la tubería a presión de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal



Nota. Se puede observar en la figura las elevaciones, recorridos y pendiente de la tubería a presión. Fuente: Hidroequinoccio EP

2.2.5. Casa de máquinas.

Al final de la tubería a presión se ubica la casa de máquinas, dentro de la cual se alberga los equipos electromecánicos, como son 2 válvulas mariposa, 2 turbinas Francis de eje horizontal de 5 Mw c/u, 2 generadores síncronos de 5 MW c/u, 1 transformador de servicio de 100 KVA y 1 switchgear. Adicionalmente cuenta con una sala de control.

Esta casa de máquinas fue construida con un diseño estructural sismorresistente que abarca un área de construcción de aproximadamente 600 m² y recibe de sus tuberías a presión una caída bruta de 90,10 m, una caída neta 87,47 m y pérdidas de carga de 2,63 m para el caudal de 13 m³/s.

Figura 10.

Válvulas mariposa, turbinas Francis, generadores síncronos, transformador de servicio, switchgear y sala de control, respectivamente



Nota. Se observa los equipos en el interior la casa de máquinas. Fuente: CEM Palmira-Nanegal

2.2.6. Subestación eléctrica.

A un costado de la casa de máquinas se encuentra la Subestación Eléctrica, la cual tiene una línea de transmisión de 69 KW, una longitud aproximada de 25 kilómetros, 54 torres, conductor ACAR 500 y cable de guarda OPGW con fibra óptica de 24 hilos, los cuales conjuntamente conectan a la Subestación de Los Bancos-Subestación Santo domingo S/N.

Figura 11.

Subestación de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal



Nota. Se puede visualizar la subestación encargada de transformar la energía eléctrica. Fuente: CEM Palmira-Nanegal

2.2.7. Obras de excesos del tanque de carga.

Como objeto de estudio de este proyecto está el enfoque en las obras hidráulicas de excesos, que han sido evaluadas. Tomando como punto de partida el tanque de carga de la central hidroeléctrica. Y desde el cual se derivan las diferentes obras de excesos.

La central hidroeléctrica cuenta con las siguientes obras hidráulicas de excesos:

- Vertedero de excesos
- Canal de recolección y conducción de excesos
- Rápida de excesos
- Obra de disipación

2.2.7.1. *Vertedero de excesos.*

Es parte del tanque de carga, el paramento del vertedero coincide con la pared al costado derecho del tanque de carga, está construido de hormigón armado al igual que el tanque y tiene como dimensiones 36.1 m de longitud, altura de 3.47 m y 0.5 m de espesor. La cresta del vertedero se ubica a 20 cm por encima del nivel de operación normal del taque.

El flujo que atraviesa el tanque de carga y descarga por medio del vertedero hacia el canal, ocasiona turbulencia al inicio del canal de recolección, cabe recalcar que esta turbulencia no ocasiona daño en ninguna sección del taque de carga.

Figura 12.

Corte transversal tanque de carga, (visualización dimensiones del vertedero)



Nota. La figura muestra el canal con el que ingresa, el tanque de carga y el vertedero. Fuente: Planos As Built CEM Palmira-Nanegal

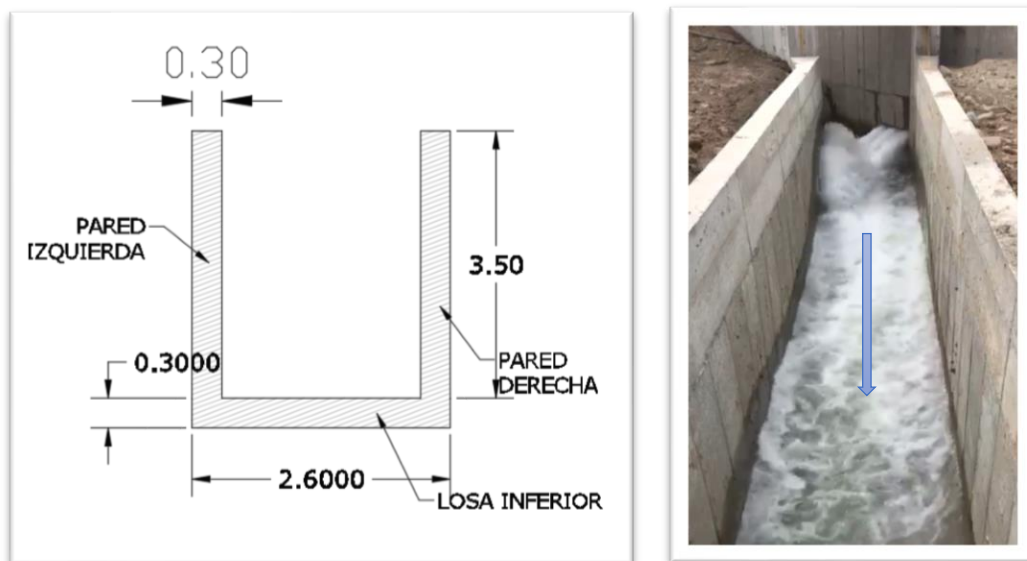
2.2.7.2. Canal de recolección y conducción de excesos.

Está construido de hormigón armado y tiene sección rectangular, de 3.5 m de altura que corresponde a la altura del vertedero, base de 2 metros y ancho de pared de 0.3m.

El flujo que atraviesa el vertedero origina turbulencia en el canal de recolección, con pendiente de 0.4%, a la final del canal correspondiente, a 36.1 m está construido en su geometría un cambio de pendiente brusco que ocasiona un salto negativo de 1.97m, luego de este salto, el flujo continúa su curso por el canal de conducción de excesos, con pendiente moderada de 0.1%, correspondiente a la longitud de 41.8 m, hasta llegar al inicio de la rápida lisa.

Figura 13.

Geometría del canal de conducción de excesos (Corte transversal), fotografía canal aguas arriba



Nota, Se puede observar la curvatura del canal antes del ingreso al canal de conducción de excesos.

Fuente: Planos As Built CEM Palmira-Nanegal

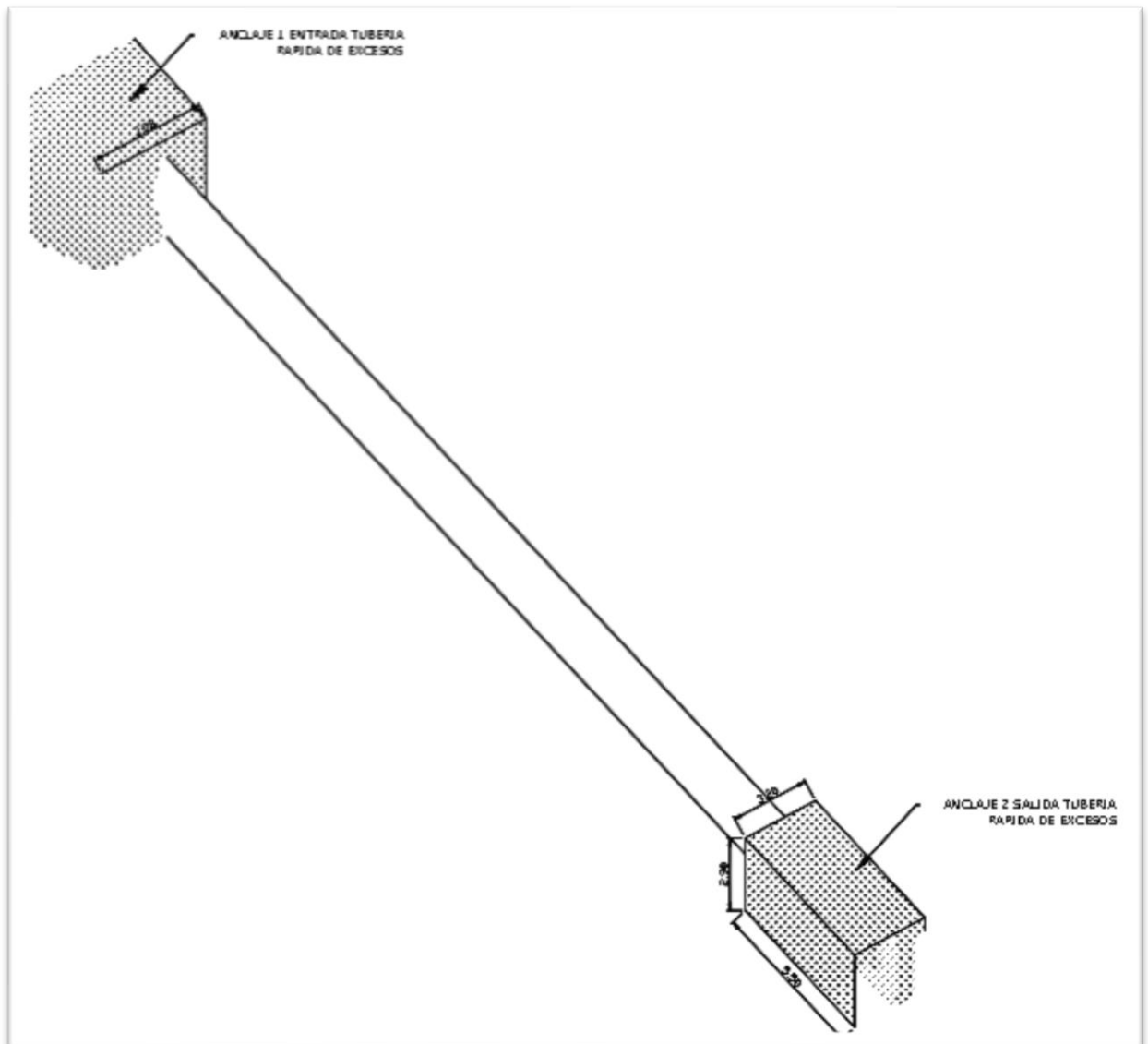
2.2.7.3. *Rápida de excesos.*

Se trata de un tubo de acero de 2.2 m y se considera como una rápida lisa cerrada de sección circular, al inicio y al final de la tubería se encuentran bloques de anclaje.

En su geometría cuenta con pendiente de 55.9%, ocasionando el aumento en la velocidad de flujo a medida que recorre la longitud de la rápida y se deposita en la obra de disipación.

Figura 14.

Rápida lisa con sus respectivos anclajes



Nota. La figura muestra la tubería de acero lisa, su pendiente y anclajes correspondientes. Fuente: Planos As Built CEM Palmira-Nanegal

2.2.7.4. *Obra de disipación de energía residual.*

Esta obra de disipación reposa sobre la quebrada (S/N), en la cual se han proyectado obras de disipación como una losa de hormigón en el fondo y un bloque de hormigón armado al frente,

esta estructura disipa la energía del flujo causada por las altas velocidades de la rápida de excesos, y como consecuencia directa se origina turbulencia sobre ella.

Figura 15.

Estructura de disipación existente

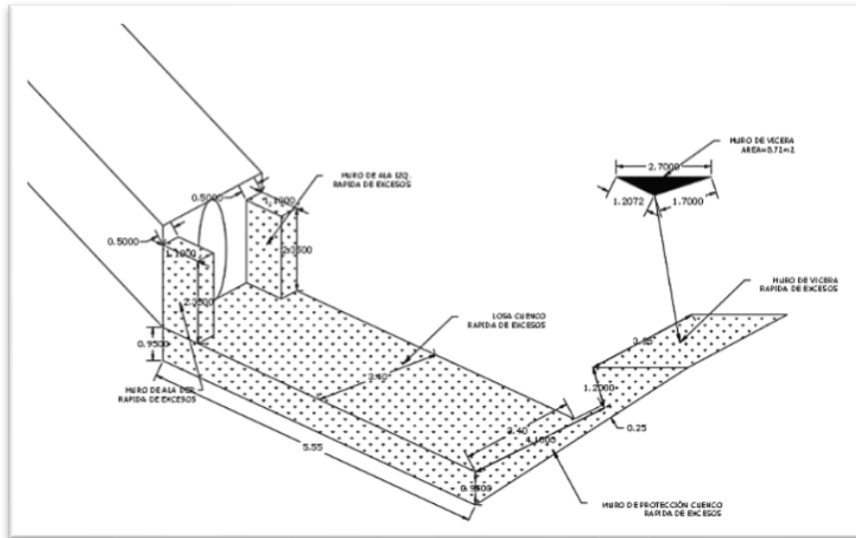


Nota, Se puede visualizar como el agua excedente regresa a su cauce natural. Fuente: CEM Palmira-Nanegal

Esta estructura se compone de dos muros de ala de hormigón armado, los cuales mantienen la dirección del flujo hacia el resto de la estructura, en la base se encuentra a manera de losa, una estructura de hormigón y rocas, y posteriormente en el frente, un muro de hormigón armado.

Figura 16.

Estructura de disipación con sus respectivas distancias.



Nota. Se puede observar la estructura de disipación y sus elementos, Fuente: Planos As Built CEM Palmira-Nanegal

2.3. Información base para el estudio

La información base necesaria para poder realizar el estudio de este proyecto ha sido suministrada por la gerencia de la C.E.M. Palmira-Nanegal en base a los diseños definitivos de la misma.

Dentro de la información facilitada por la Hidroeléctrica Palmira-Nanegal se encuentran los siguientes ítems:

- Planos as built en planta y corte de las obras de excesos de la central hidroeléctrica con sus respectivas cotas, en formato .dwg.
- Planos de detalles constructivos de las diferentes obras de excesos del tanque de carga de la central hidroeléctrica, en formato .dwg.
- Caudal de diseño.

De los planos se puede obtener la geometría, niveles y cotas del terreno. En conjunto con los parámetros de diseño anteriormente mencionados se procedió a realizar la evaluación y optimización hidráulica de las obras de excesos del tanque de carga de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal utilizando el software ANSYS CFX.

CAPÍTULO III
BASE TEÓRICA PARA LA EVALUACIÓN, DISEÑO Y SIMULACIÓN
NUMÉRICA DE LAS OBRAS DE EXCESOS

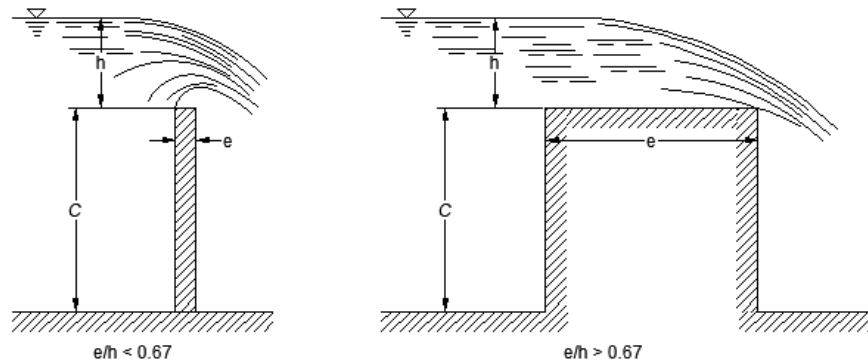
3.1. Fundamentos de la mecánica de fluidos tradicional

3.1.1. Vertedero.

Es un elemento hidráulico que sirve para controlar el paso del agua, también se le conoce como aliviadero. Existen varios tipos de aliviaderos, pueden clasificarse de distinta manera (tipo, forma, etc.) entre los más comunes se tiene: el vertedero de pared delgada, se presenta cuando la descarga del agua se realiza por una arista aguda (*Condición: $e/h < 0.67$*), y el vertedero de pared ancha se presenta cuando se tiene una arista gruesa (*Condición: $e/h > 0.67$*). (Sotelo, 1997, p.241)

Figura 17.

Clasificación de vertederos según Sotelo, 1997.



Nota. Se puede observar un vertedero de pared delgada y un vertedero de pared ancha. Fuente: los autores

La ecuación que define el cálculo del caudal se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli, hay varias formas de hallar la ecuación general, sin embargo, para la resolución de estos elementos hidráulicos, se utiliza la siguiente formula:

$$Q_{dis} = m \varepsilon B \sqrt{2g} H_o^{3/2} \quad (1)$$

Donde:

B Ancho del vertedero.

ε Coeficiente de contracción lateral ($\varepsilon=1$ si no tiene contracción).

m Coeficiente de descarga en función del tipo de vertedero.

$$m = 0,402 + 0,054 \frac{H_o}{C} \quad (2)$$

C Altura anterior de la cara del vertedero

H_o Altura total del vertedero.

$$H_o = H + \frac{V_o^2}{2g} \quad (3)$$

Se estima que los calados (h_c ; h_2) en el canal de recolección a continuación del vertedero, se los puede determinar con el uso de las ecuaciones de conservación de energía que se detalla de la siguiente manera:

Ec. Energía específica:

$$E_o = H_o + C \quad (4)$$

Ec. Energía esp. Según su calado contraído

$$E_o = h_c + \frac{q^2}{hc^2 * \rho^2 * 2 * g} \quad (5)$$

Ec. Profundidad crítica.

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (6)$$

Ec. Segunda conjugada.

$$h_2 = \frac{1}{2} h_c \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{cr}}{h_c} \right)^3} - 1 \right] \quad (7)$$

Donde:

- H_o Altura total del vertedero.
- C Altura anterior de la cara del vertedero
- E_o Energía específica
- h_c Profundidad contraída
- q Caudal unitario
- h_{cr} Profundidad crítica
- g Gravedad
- h_2 Segunda conjugada del resalto
- φ Coeficiente de velocidad

3.1.1.1. *Tipos de flujo*

Para el análisis de las obras de excesos, en primera instancia es necesario mencionar los diferentes tipos de flujos, para lo cual pueden clasificarse de varias maneras entre ellas: Flujo permanente y Flujo no permanente.

Flujo permanente. - Es el flujo en el cual el caudal no cambia en el tiempo, es decir, es constante en un intervalo de tiempo.

1. Flujo uniforme. Es el flujo que se desarrolla en un canal recto, que no cambia en el tiempo y espacio.
2. Flujo variado. Es el flujo en el cual existe variación de calado y velocidad.
 - a. Flujo gradualmente variado, es un flujo permanente cuya profundidad varía de manera gradual a lo largo de un canal.
 - b. Flujo rápidamente variado, es un flujo permanente en el cual la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias cortas, como es el caso de los vertederos.

Flujo no permanente. - Es un flujo en el que sus parámetros profundidad, velocidad, área y caudal cambian con el tiempo, es decir en una sección del canal no permanecen constante.

3.1.2. Canal de recolección.

Es la obra hidráulica, diseñada para recolectar agua del tanque de carga y trasportarla sin sobrevertido. El flujo que se desarrolla en el canal es espacialmente variado, tiene una pendiente de fondo constante, su geometría depende del diseño, pero suele ser rectangular, triangular, trapezoidal, circular y parabólica.

3.1.2.1. *Flujo espacialmente variado.*

El flujo espacialmente variado, tiene un caudal no uniforme a lo largo del canal de recolección. La variación del agua (incremento o decremento del caudal) causa perturbaciones en el contenido de energía o de moméntum del flujo. Por lo tanto, el flujo espacialmente variado tiene un método más complejo que un flujo de caudal constante. En consecuencia, se tiene dos tipos de flujo los cuales son:

Flujo con caudal creciente. – Es un flujo en el cual su caudal aumenta según avanza la longitud del canal. Existe una pérdida de energía por la mezcla del impacto del agua del agua en el canal.

Flujo con caudal decreciente. - Es un flujo que disminuye el caudal conforme avanza la longitud. Tiene como propósito desviar o rebosar excesos del fluido, donde el agua no afecta la altura de la energía.

Ecuación dinámica para flujo espacialmente variado (caudal creciente). - La ecuación diferencial fundamental con caudal creciente fue establecida por primera vez por Hinds, y, una ecuación más completa la desarrolló Favre, la misma que se detalla a continuación:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{S_o - S_f - \frac{2\alpha Qq}{gA^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^2 D}} \quad (8)$$

Donde:

- Sf pendiente de fricción.
- So pendiente geométrica del canal.
- q Caudal unitario.
- D Profundidad hidráulica (calado).
- α Coeficiente de reducción de velocidad.

3.1.2.2. *Resalto hidráulico en elementos rectangulares.*

El resalto hidráulico en un canal rectangular disipa la energía del flujo a través de la resistencia friccional a lo largo del canal, dando como resultado un descenso de velocidad y un incremento en la profundidad de la dirección del flujo. Las ecuaciones del resalto hidráulico son las siguientes:

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gL}} \quad (09)$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (10)$$

Donde:

F_1 Número de froude para la profundidad de flujo y_1

L Longitud característica del canal

V_1 Velocidad

g Gravedad

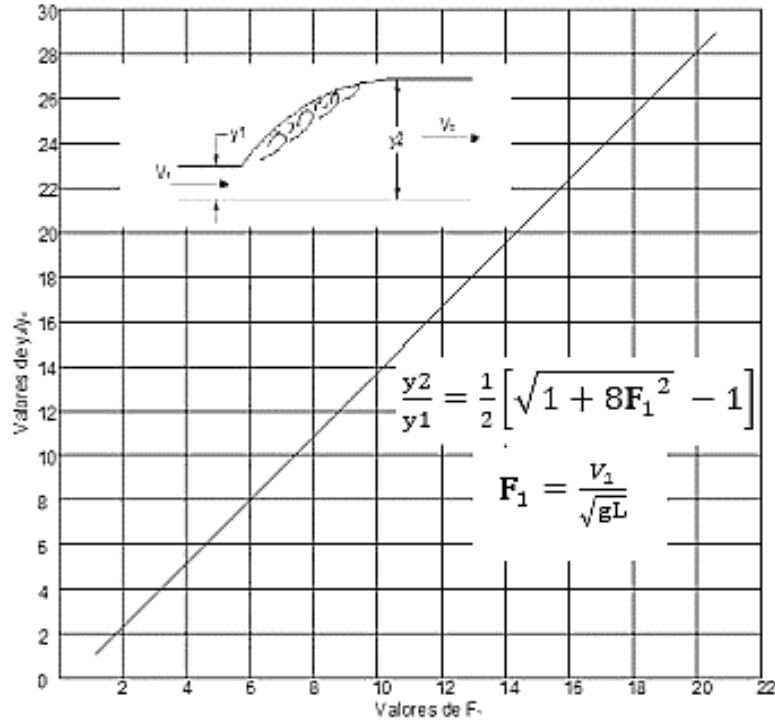
y_1 Profundidad aguas arriba

y_2 Profundidad aguas abajo

Estas ecuaciones pueden representarse en el siguiente diagrama:

Figura 18.

Relación entre F_1 y y_2/y_1 para el resalto



Nota. La figura se muestra el diagrama del número de Froude y la relación entra la profundidad.

Fuente: Ven Te Chow (2004)

3.1.2.2.1. Número de Froude.

Según Ven Te Chow (2004), en canales abiertos y cerrados el efecto de la viscosidad del agua, las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales pueden producir varios regímenes de flujo. Esta relación se la conoce como el número de Froude definido de la siguiente manera:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (11)$$

Donde:

V es la velocidad de flujo

g es la aceleración gravitacional

L longitud característica del canal

De esta manera podemos clasificar 3 tipos de regímenes de flujo

- 1) Subcrítico, cuando F es menor a 1
- 2) Supercrítico, cuando F es mayor a 1
- 3) Crítico, cuando F es igual a 1

3.1.2.2.2. Tipos de resalto hidráulico

De acuerdo con los estudios de U.S. Bureau of Reclamation, estos pueden clasificarse según el número de Froude (F).

Para $F = 1$, el flujo es crítico y por consiguiente no se forma el resalto.

Para $F = 1$ a 1.7 , la superficie del agua muestra ondulaciones y se presenta un esalto ondulante.

Para $F = 1.7$ a 2.5 , se desarrolla una serie de remolinos sobre la superficie del resalto, sin embargo, la superficie del agua, hacia aguas abajo, permanece uniforme. Se presenta un resalto débil.

Para $F = 2.5$ a 4.5 , existe un chorro oscilante que entra desde el fondo del resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad, en consecuencia, se produce un resalto oscilante.

Para $F = 4.5$ a 9.0 , la extremidad de aguas abajo del remolino superficial y el punto sobre el cual el chorro de alta velocidad tiende a dejar el flujo, ocurren prácticamente en la misma sección vertical. El resalto se encuentra bien balanceado, en consecuencia, se produce un resalto estable.

Para $F = 9.0$ y mayores, el chorro de alta velocidad choca con paquetes de agua intermitentes que corren hacia abajo a lo largo de la cara frontal del resalto, la acción del resalto es brusca pero efectiva, se produce un resalto fuerte (Ven Te Chow, 2004, p.388).

3.1.3. Canal de conducción de excesos.

Su función es trasportar el agua excedente desde el canal de recolección, hasta la rápida de excesos, por lo general un canal de conducción de excesos debe tener un flujo subcrítico, esto quiere decir, que su pendiente de fondo es menor a la crítica, y las secciones más usadas son rectangular, trapezoidal.

3.1.3.1. *La ecuación de Manning.*

Es una ecuación que parte de la fórmula de Chezy para el análisis y cálculo de velocidades en canales abiertos y tuberías. El ingeniero irlandés Robert Manning en 1889 presento la ecuación por primera vez, la misma que se ha modificado con el paso del tiempo, en consecuencia, se ha determinado la siguiente formula (Ven Te Chow, 2004, p.97).

$$V = \frac{1}{n} * Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Donde:

- V Velocidad media.
- Rh Radio hidráulico
- S Pendiente de la línea de energía
- n Coeficiente de resistencia al flujo

3.1.3.2. *Flujo gradualmente variado*

Este tipo de flujo se obtiene en canales con flujo en superficie libre, la ley de continuidad establece la conservación de la masa en un espacio infinitesimal entre dos secciones de canal.

A continuación, se describe la ecuación partiendo de un perfil de longitud elemental dx de un canal abierto. La altura total aguas arriba es:

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

Donde:

- H Es la altura total de energía en pies.
- z Es la distancia vertical del fondo del canal
- θ Ángulo de pendiente de fondo
- α Coeficiente de energía
- V Velocidad media del flujo a través de la sección

Al tomar el fondo del canal como el eje x y al derivar la ecuación (14) con respecto a la longitud x , se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial z}{\partial x} + \cos \theta \frac{\partial d}{\partial x} + \alpha \frac{\partial z}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (14)$$

La pendiente se define como el seno del ángulo de la pendiente y se supone que es positiva si desciende en la dirección del flujo y negativa si asciende.

Por consiguiente:

$$S_f = \frac{\partial H}{\partial x} \quad (15)$$

$$S_o = \sin \theta = -\frac{\partial z}{\partial x} \quad (16)$$

Al sustituir las pendientes en la ecuación (15) y resolver $\partial d / \partial x$

$$\frac{\partial d}{\partial x} = \frac{S_o - S_f}{\cos \theta + \alpha \frac{\partial}{\partial d} \left(\frac{V^2}{2g} \right)} \quad (17)$$

Esta es la ecuación diferencial general para el flujo gradualmente variado, conocida también como la ecuación de flujo gradualmente variado.

En la ecuación anterior el ángulo θ es función de x , la cual debe sumarse al denominador. Para θ pequeño, $\cos \theta = 1$, $d=y$ y $\partial d / \partial x = \partial y / \partial x$. Luego la ecuación se convierte en:

$$\frac{\partial d}{\partial x} = \frac{S_o - S_f}{1 + \alpha \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V^2}{2g} \right)} \quad (18)$$

Uno de los métodos para la resolución de canales rectangulares con flujo gradualmente variado es el de Charnosky, que parte de ecuaciones de conservación de energía y de los parámetros de la sección de flujo. A continuación, se detallan las ecuaciones a utilizar:

$$w = b * h \quad \text{Sección de flujo (w)} \quad (19)$$

$$E_i = h + Q^2 / w^2 * 2g \quad \text{Energía (Ei)} \quad (20)$$

$$\Delta \varepsilon = E_i - E_{(i+1)} \quad \text{Variación de energía} \quad (21)$$

$$\bar{h} = h_i + h_{(i+1)} / 2 \quad \text{Profundidad media} \quad (22)$$

$$\bar{w} = b * \hat{h} \quad \text{Sección media de flujo} \quad (23)$$

$$\bar{x} = b + 2\bar{h} \quad \text{Perímetro medio de flujo} \quad (24)$$

$$\bar{R} = \bar{w} / \bar{x} \quad \text{Radio medio} \quad (25)$$

$$\bar{C} = 1.49 * \bar{R}^{1/6} \quad \text{Coeficiente medio de chezy} \quad (26)$$

$$i_f = Q^2 / \bar{w}^2 * \bar{C}^2 * \bar{R} \quad \text{Gradiente de fricción} \quad (27)$$

$$\Delta S = \Delta \varepsilon / i - i_f \quad \text{Variación de longitud, Ecuación de Charnosky} \quad (28)$$

Tipos de perfiles de flujo.

Los perfiles de flujo pueden clasificarse en trece tipos diferentes, de acuerdo con la naturaleza de la pendiente del canal y la zona en la cual se encuentra la superficie del flujo (zona subcrítica, crítica y supercrítica). Estos tipos se designan como: ***H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3; y A2, A3;*** donde la letra describe la pendiente.

Para perfiles tipo **H**, se presenta una pendiente Horizontal.

Para perfiles tipo **M**. $S_o < S_c$; $y_n < y_c$; presenta una pendiente suave (subcrítica).

Para perfiles tipo **C**. $S_o = S_c$; $y_n = y_c$; presenta una pendiente crítica.

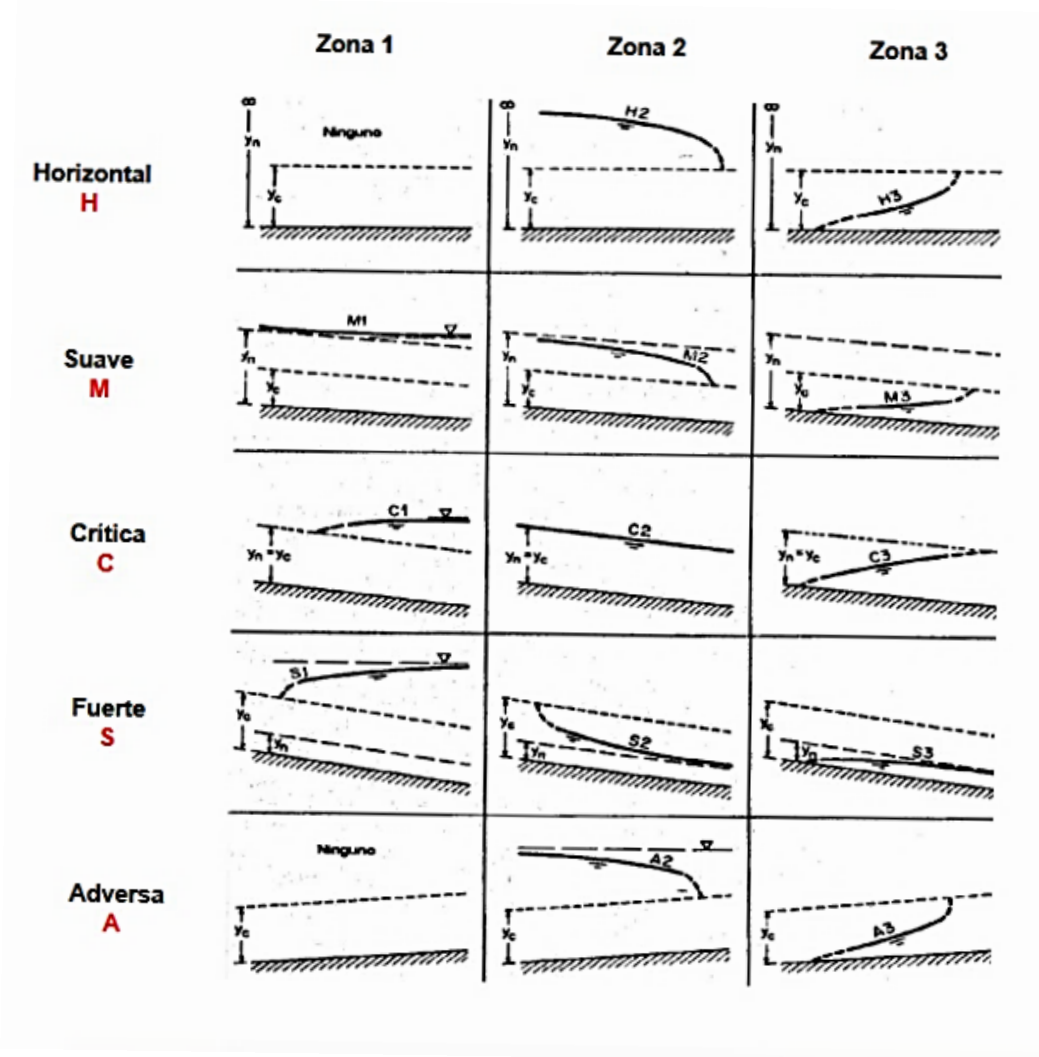
Para perfiles tipo **S**. $S_o > S_c$; $y_n < y_c$; presenta una pendiente fuerte (supercrítica).

Para perfiles tipo **A**. $S_o < 0$ presenta una pendiente adversa (Ven Te Chow, 2004, p.220).

Para el análisis matemático, este método es muy práctico y a su vez muy utilizado, ya que, permite estimar el perfil del flujo.

Figura 19.

Tipos de perfiles para flujo gradualmente variado.



Nota. En la figura se muestra los tipos de perfiles y su zona subcrítica, crítica y supercrítica respectivamente. Fuente: Ven Te Chow(2004).

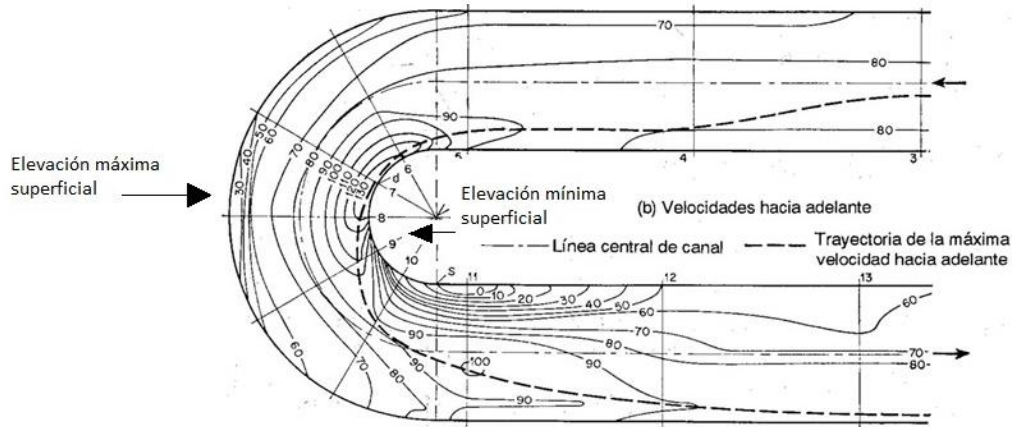
3.1.3.3. *Sobreelevación.*

Es la elevación superficial del agua a lo largo de un canal curvo, en la Figura 20, se puede observar la línea de máxima velocidad en el canal, cabe mencionar, que la curva interna es el sitio

donde la altura del agua alcanza el nivel mínimo, y, en cambio la curva externa tiene una máxima elevación superficial.

Figura 20.

Esquema de la sobrelevación.



Nota. La figura muestra la sobrelevación máxima y mínima en la curvatura del canal. Fuente: Ven Te Chow(2004).

El método más simple para determinar la sobrelevación, que se deriva de la segunda ley de movimiento de Newton, establece que todas las velocidades de los filamentos en la curva son iguales a la velocidad media (V_m) y todas las líneas de corriente tiene un radio de curvatura (rc), puede demostrarse que la superficie transversal del agua debe ser en una línea recta. En el libro de Ven Te Chow, 2004 detalla una ecuación para la sobrelevación:

$$\Delta h = \frac{V_m^2 * b}{g * rc} \quad (29)$$

Donde:

V_m velocidad media

rc radio de curvatura

- b ancho del canal
- g fuerza de atracción gravitacional

3.1.4. Rápida de excesos.

Las rápidas son estructuras de conducción, cuyo objetivo principal es salvar los desniveles que se van acumulando, debido a la diferencia existente entre las pendientes del canal y la natural del terreno, correspondientes al eje longitudinal del mismo. Las rápidas sirven para unir dos tramos de canal cuyo desnivel es considerable. (Rodríguez, 2008, p.357).

Las rápidas pueden ser: rápidas abiertas y rápidas cerradas o de tubo.

Las rápidas abiertas forman su conducto con un canal trapezoidal o rectangular, que generalmente se reviste de un material adecuado para resistir las velocidades de tipo erosivo; este revestimiento en la generalidad de los casos es de hormigón, cuando el canal de la rápida queda en roca sana y con suficiente resistencia se suprime el revestimiento (Rodríguez, 2008, p.357).

En las rápidas cerradas el conducto está formado generalmente por un tubo de acero.

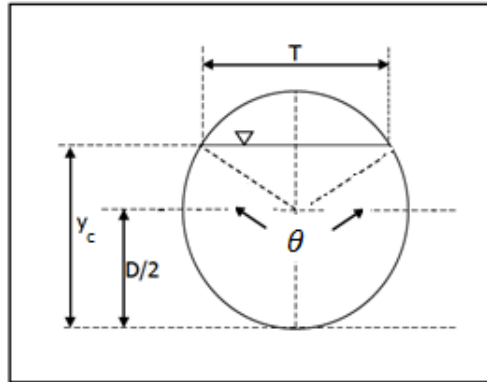
3.1.4.1. Rápida circular lisa

La rápida circular lisa es un tubo con una superficie lisa, por un conducto cerrado, entre los elementos más comunes utilizados son los tubos de acero.

Por lo cual, los parámetros geométricos de estudio de la tubería circular lisa son; el área, perímetro mojado y radio hidráulico. En la figura 21, se puede notar que θ es el ángulo del semicírculo, y_c es el calado crítico, y, D es el diámetro:

Figura 21.

Parámetros de una sección circular.



Nota. La figura muestra cómo se determina los parámetros de un tubo circular. Fuente: Los autores.

Donde:

$$\text{Área:} \quad A = \frac{1}{8} (\theta - \sin \theta) d_o^2 \quad (30)$$

$$\text{Perímetro:} \quad P = \frac{1}{2} (\theta * d_o) \quad (31)$$

$$\text{Radio hidráulico:} \quad R = \frac{1}{8} \left(\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \frac{1}{2} \theta} \right) d_o \quad (32)$$

En una rápida cerrada, su configuración es parecida a una rápida lisa (abierta), por lo que se puede distinguir en ellas las siguientes partes:

Transición de entrada; Sección de control; Rápida; Trayectoria; Colchón; Transición de salida.

Aireación en la rápida lisa circular.

El fenómeno de la aireación consiste en la incorporación de burbujas de aire dentro de la sección mojada. La cantidad de aire aumenta con la velocidad y gradualmente se obtiene una mezcla agua aire de un peso específico menor que el agua.

Krochin (1968), establece que en la absorción y transporte de aire consume parte de la energía del flujo y reduce su velocidad.

Cuando el aire de un flujo es incorporado, aumenta el volumen del fluido. (Krochin, 1978, p.262).

Lorenz G. Straub y Alvin G. Anderson en el laboratorio St. Anthony Falls de Minneapolis. Determinaron una ecuación en la cual se obtiene la concentración de aire en una rápida lisa de acero.

$$c = 0.38 \log_{10} \left(\frac{J}{q^{2/3}} \right) + 0.77 \quad (33)$$

Donde:

J Gradiente en función del ángulo de la rápida $J = \text{sen } \alpha$

q Caudal por unidad de longitud

c Concentración de aire

Para determinar el incremento del calado de agua, en la introducción de aire se lo puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{y}{(1 - c)} \quad (34)$$

Donde:

y Calado de la sección de flujo

d Calado más el incremento de las burbujas de aire

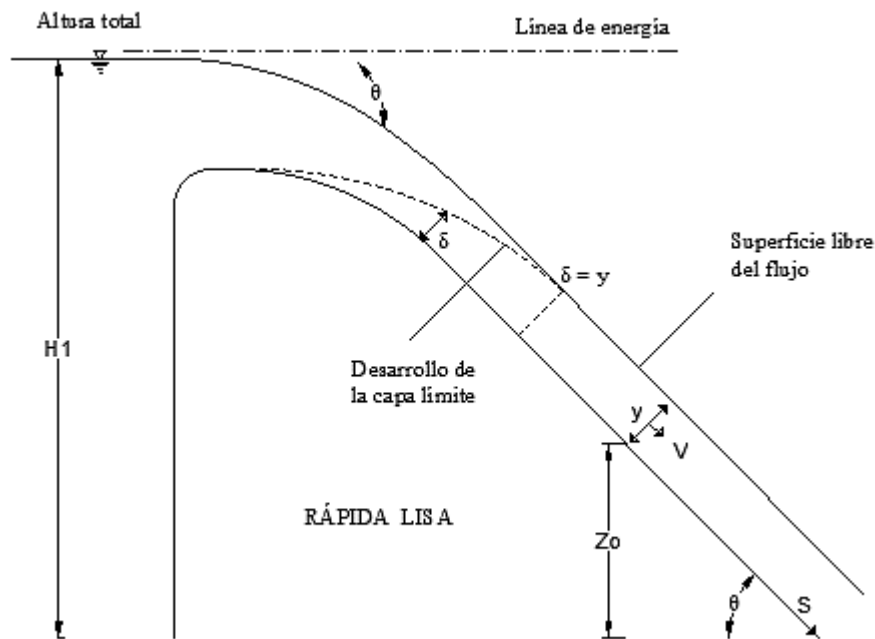
c Concentración de aire

Incepción de aire en la rápida circular.

La introducción de aire ocurre al momento en el cual la región del flujo gradualmente variado ideal se desarrolla, obteniendo un calado (y) y se interseca con la capa límite turbulenta (δ), en ese instante se obtiene la incepción de aire en el lecho del canal o tubería. Por lo cual $\delta = y$.

Figura 22.

Gráfico de intersección de capa límite y flujo desarrollado.



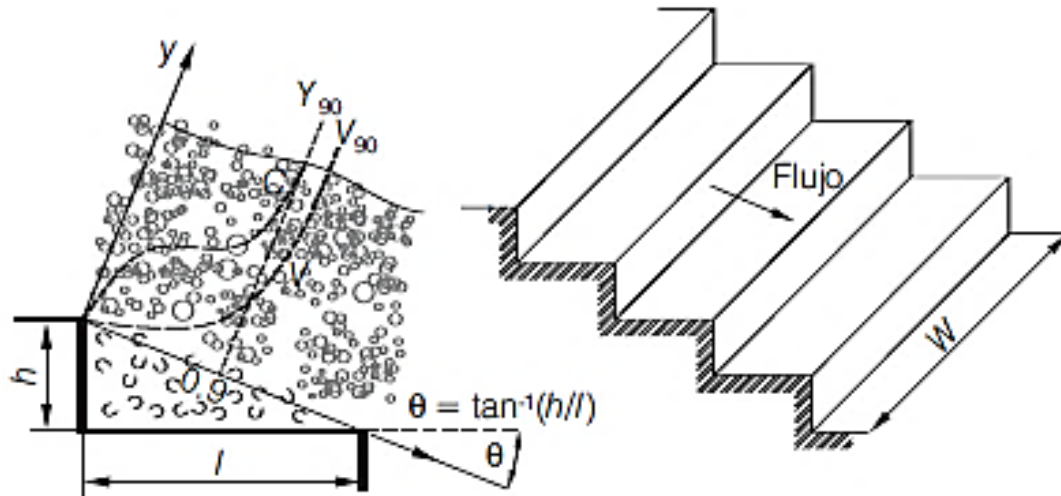
Nota. La figura muestra los parámetros de la rápida de superficie lisa. Elaborado por: Los autores.

3.1.4.2. Rápida escalonada.

Es un canal artificial inclinado formado por escalones, en donde h es la contrahuella, L es la huella y θ es el ángulo de la rápida. El flujo que escurre en estos canales escalonados es altamente turbulento y presenta aireación (flujos aire-agua).

Figura 23.

Elementos de una rápida escalonada



Nota. La figura muestra los parámetros de una rápida escalonada. Fuente: Rodríguez (2008).

Tipos de flujo en la rápida escalonada.

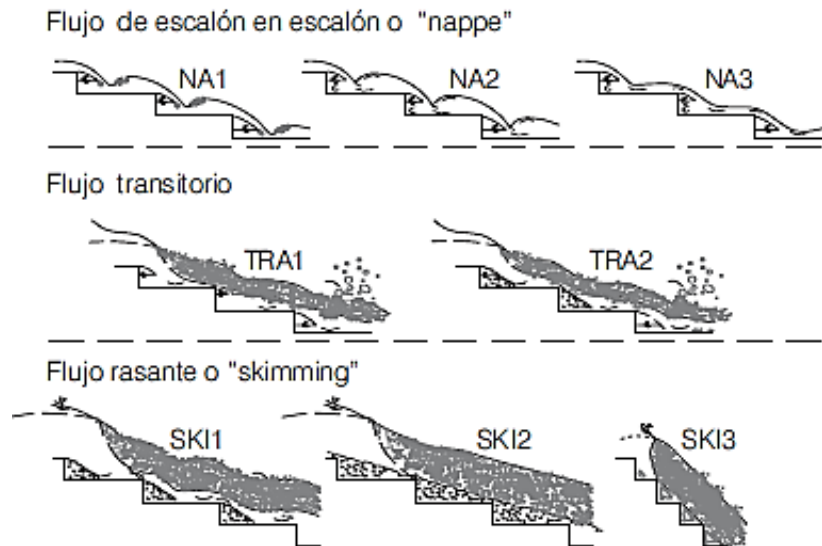
El flujo de una rápida escalonada se divide según su caudal de operación en tres diferentes regímenes:

- Flujo de escalón a escalón (nappe flow), se caracteriza por una sucesión de saltos de agua en caída libre, que inciden sobre los escalones con resaltos hidráulicos total o parcialmente desarrollados (R.M. Khatusuria).
- Flujo de transición, su régimen es parecido al anterior con la característica de que comienza a generar aireación, salpicaduras y tiene apariencia caótica. También se observa que las propiedades del flujo varían de escalón a escalón (Khatusuria, 2006).
- Flujo Rasante (skimming flow), es parecido al anterior flujo, con la presencia de mayores caudales aumenta la descarga y la cavidad debajo de cada salto desaparece por

completo, eso quiere decir que el agua llena todo el escalón y el flujo del agua se desliza sobre todos los escalones desarrollándose un falso fondo.

Figura 24.

Tipos de flujo en la rápida escalonada



Nota. Se observa los tipos de flujo y cómo actúan sobre la superficie del escalón. Fuente: Khatusuria (2006).

Flujo rasante (skimming flow).

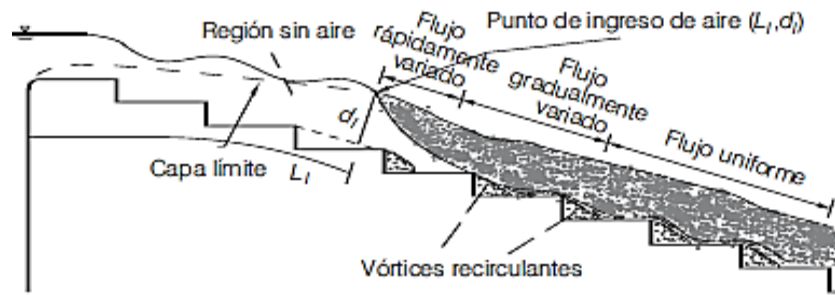
En el presente diseño se utiliza el flujo rasante por su eficiencia al momento de disipación de energía al paso del agua, ya que se desliza sobre un pseudo-fondo formado por los escalones (Chamani & Rajaratham 1999). En las cavidades de los escalones se forman vórtices recirculantes y el movimiento se mantiene a través de esfuerzos cortantes del flujo principal y este comportamiento disipa la mayor parte de la energía cinética. (Chanson 1994b,1995).

Para este tipo de flujo rasante, se aprecia que tiene cierta similitud con el flujo en rápidas de fondo liso. Y se observó una región de flujo rápidamente variado, en el cual grandes

cantidades de aire son atrapadas en la superficie libre e inyectando aguas abajo, en el momento que el flujo está completamente desarrollado presenta una zona de flujo gradualmente variado y según avanza alcanza una zona de flujo uniforme es decir de calado constante. Se puede visualizar el fenómeno en la siguiente ilustración:

Figura 25.

Detalle de un flujo rasante con sus diferentes tipos de zonas.



Nota. Se observa en la figura como ingresa el aire después de la capa límite. Fuente: Chanson (2004).

Los estudios establecen 3 tipos de pendientes para un flujo rasante

- SK1 Para pendientes baja a moderada $5^\circ < \theta < 22^\circ$
- SK2 Para pendientes baja a moderada $5^\circ < \theta < 22^\circ$
- SK3 Para pendientes mayores a $\theta > 22^\circ$

Figura 26.

Tipos de flujo rasante



Nota. La figura muestra los diferentes tipos de pendiente para el flujo rasante. Fuente: Khatsuria (2006).

Parámetros de cálculo para el flujo rasante (skimming flow). - se recopilaron de varias ecuaciones, de los siguientes autores:

$$y_n = y_c \times 0.215(\sin \alpha)^{1/3} \quad \text{Profundidad normal; Boes, (2000)} \quad (35)$$

$$\frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 \frac{h}{l} \quad y_c/h; \text{Chanson, (2002)} \quad (36)$$

$$\frac{h}{y_c} \geq 0.3 \quad \text{Peralte optimo; Matos, (2000)} \quad (37)$$

$$l_{calc} = \frac{h}{\frac{1}{m^2}} \quad \text{Longitud de huella calculada (lcalc)} \quad (38)$$

$$\frac{Hr}{hcr} < 10 \quad \text{Comprobación, Mateos & Elviro (1999)} \quad (39)$$

Donde:

y_n Profundidad normal

y_c Profundidad critica

- m2 Pendiente aguas abajo
h Peralte (huella del escalón)

Flujo auto aireado en skimming flow

Para la rápida escalonada con flujo rasante, la ubicación del punto de inyección, puede derivarse de una expresión semi-analítica en base al desarrollo de la capa turbulenta (Chanson, 1994).

$$\frac{L_l}{h \times \cos \theta} = 9.719 \times \sin \theta^{0.0796} \times F_*^{0.713} \quad (40)$$

Donde:

- L_l Es la longitud de la capa límite

 θ Es el ángulo de la pendiente de la rápida y la horizontal

 F_* Es el número de Froude en términos de rugosidad

Para hallar el número de Froude de rugosidad se tiene varias alternativas y se determinó con las siguientes ecuaciones:

$$F_i = \frac{q_u}{\sqrt{g_*^2 h_* k^3}} \quad \text{Froude de rugosidad (Chamani)} \quad (41)$$

$$F_* = \frac{q_u}{\sqrt{g \sin \alpha K^3}} \quad \text{Froude de rugosidad (Chanson, 1994)} \quad (42)$$

Para determinar los demás parámetros se desarrolla las siguientes expresiones:

$$y_i = K * \frac{0.4034}{(\sin \alpha)^{0.04}} * F_*^{0.592} \quad \text{Calado hasta el punto de inyección (Chanson, 1994)} \quad (43)$$

$$\bar{C} = 0.76 * \sin \theta^{0.82} \quad \text{Concentración media de aire (Matos, 2001)} \quad (44)$$

$$f_e = 0.1 \quad \text{Factor de fricción para flujo aireado (Matos, 1999)} \quad (45)$$

$$N_{Cortlis} = 3.5 \quad \text{Ley de dist. de velocidades según experimentos} \quad (46)$$

$\alpha_{Corillis} = 1.14$

Realizados por Frizell y Tozzy (Chanson, 2000)

Disipación de energía en flujo rasante

Para determinar la disipación de energía en la rápida con flujo rasante se lo puede obtener con la siguiente expresión:

$$\Delta H = H_{\text{máx}} - H_{\text{res}} \quad (47)$$

Donde:

H_{max} : Carga de energía total

H_{res} : Carga de energía residual

La energía residual en las rápidas escalonadas es generalmente baja, pero cabe recalcar que la disipación de energía en los disipadores nunca es completa, por lo que, se necesita una obra de disipación a la salida como un cuenco. La carga de energía residual H_{res} según Chanson está relacionado con el factor de fricción f .

$$\frac{H_{\text{res}}}{H_{\text{max}}} = \frac{\left(\frac{f}{8x \sin \theta}\right)^{1/3} + \frac{\alpha}{2} x \left(\frac{f}{8x \sin \theta}\right)^{-2/3}}{\frac{3}{2} + \frac{H1}{d_c}} \quad (48)$$

Donde:

H_{max} Es la carga máxima de energía en metros, incluida la carga de velocidad.

$H1$ Es el desnivel del ingreso de la rápida con la del fondo aguas abajo.

θ Es el ángulo de inclinación de la rápida escalonada.

α Es el factor de corrección de energía 1.1 según (Matos 2000, Boes y Hager)

f Factor de fricción

Conocidos los parámetros de disipación, se determinó la velocidad de aguas claras de la rápida escalonada con la siguiente ecuación:

$$\frac{U_w}{V_{m\acute{a}x}} = 0.00107 * \left(\frac{H_{m\acute{a}x}}{y_c}\right)^2 - 0.0634 * \left(\frac{H_{m\acute{a}x}}{y_c}\right) + 1.202 \quad \text{Chanson y Gonzales 2007 (49)}$$

Donde:

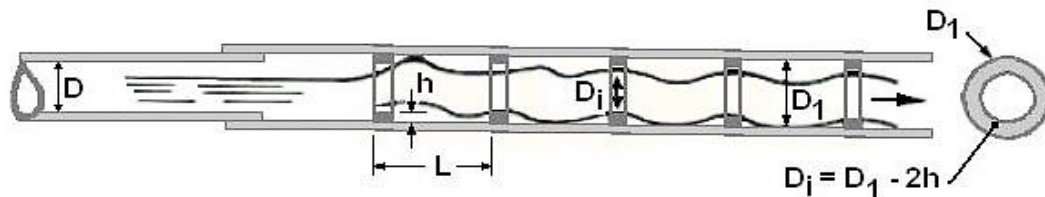
$H_{m\acute{a}x}$	Energía máxima al inicio de la disipación
Y_c	Calado crítico
U_w	Velocidad media
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidad máxima

3.1.4.3. *Rápida con anillos disipadores.*

Una alternativa de disipación de energía, se puede lograr insertando anillos circulares en el interior de una tubería de acero como se muestra en la figura 27. Las consideraciones geométricas se asemejan a las rápidas escalonadas, cuando el flujo pasa de anillo a anillo se va disipando la energía y la velocidad de acercamiento a los anillos se reduce.

Figura 27.

Gráfico para el flujo en un sistema circular



Nota. La figura muestra el paso del flujo a través de los elementos de disipación. Fuente: HEC (2014).

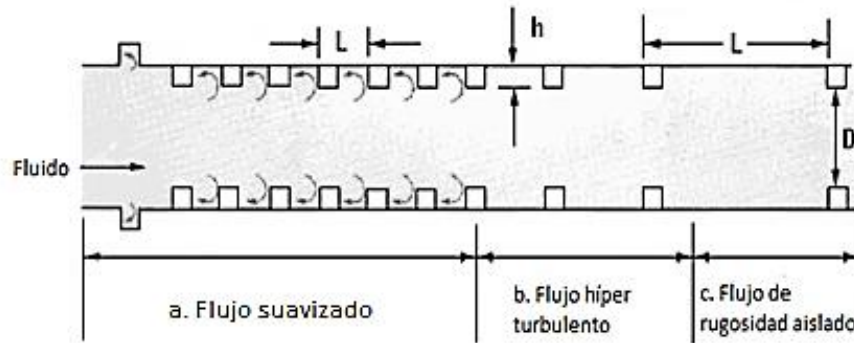
Resistencia al flujo

Wiggert y Erfle (1971) estudiaron la eficiencia de los anillos de rugosidad como disipadores de energía en tuberías circulares. Lograron ver reducciones de velocidades dependiendo del número de anillos, al duplicar la altura y al mantener un espaciado constante. Una parte clave en el estudio de estos elementos disipadores es la determinación del tipo de flujo, y posteriormente el valor “n” de Manning equivalente.

Morris (1963) estudió todos los datos pertinentes del flujo de tuberías y concluyó que hay tres regímenes, se describen en la siguiente ilustración:

Figura 28.

Regímenes de flujo según Morris 1963



Nota. Se observa los tipos de flujo que se presentan en una tubería circular. *Elaborado por:* Los autores a través de HEC (2014).

- Flujo suavizado, este régimen no aplica para este capítulo por que la disipación de energía es mínima, solo se suaviza el flujo (L/h aproximadamente 2.).
- Flujo híper- turbulento, se produce cuando los elementos de rugosidad están cerca y los vórtices de superficie rugosa (anillos) son la fuente principal del arrastre de la fricción.
- Flujo de rugosidad asilada, se desarrolla cuando el espaciado de los anillos de rugosidad es grande y la resistencia friccional con la superficie de la tubería.

Flujo Híper turbulento.

La fricción en este régimen es independiente de la fricción en la superficie de la tubería. Para este modelo de estudio se puede ver que la altura de rugosidad artificial (h), se incluye en el diámetro interno (D_i), en consecuencia, el coeficiente de rugosidad Manning para el flujo híper

turbulento (n_{HT}) aumenta a medida que el espaciado aumenta. Por lo que la HEC14 establece la siguiente ecuación:

$$n_{HT} = \frac{\alpha D_i^{1/6}}{2 \log\left(\frac{r_i}{L}\right) + 1.75} \quad (56)$$

Donde:

n_{HT} Manning para flujo híper turbulento

α Constante de conversión de unidades 0.0898 (SI) y 0,0737 (CU)

r_i Radio interno de la tubería

L Espaciado entre elementos

Flujo de Rugosidad Aislado.

Morris (1963) relacionó la velocidad al factor de la resistencia al flujo de la siguiente manera:

$$f_{IR} = f_s + f_d \quad (57)$$

Donde:

f_s = factor de fricción de en la superficie de la tubería

f_d = fricción debido al arrastre de la forma sobre los elementos de rugosidad

Con el trabajo de Morris, midió el diámetro interno de un anillo, el cual se denomina diámetro efectivo (D_i). Para convertir la expresión de rugosidad aislada n_{IR} , a partir de n de Manning utilizo las siguientes expresiones:

$$f_s = \alpha \left(n / D_i^{1/6} \right)^2 \quad (58)$$

$$f_{IR} = \alpha \left(\frac{n_{IR}}{D_i^{\frac{1}{6}}} \right)^2 \quad (59)$$

Donde:

α Constante de conversión de unidades

D_i Diámetro interno

$$n_{IR} = n \left(\frac{D_i}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + 67.2 C_D \left(\frac{L_r}{P} \right) \left(\frac{h}{L} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (60)$$

Donde:

n_{IR} Coeficiente de rugosidad aislado derivado de Manning “ n ”

n Coeficiente de Manning para la superficie de la tubería sin anillos de rugosidad

D Diámetro nominal

D_i Diámetro interior de anillos de rugosidad

C_D Valor constante de 1,9

L_r/P Relación entre longitud y perímetro mojado

L Espaciado de elementos

h altura del anillo de rugosidad

Parámetros para el diseño

Finalmente, Para el régimen del flujo híper turbulento la resistencia aumenta cuando el espaciado de elementos aumenta y cuando el espaciado disminuye se determina el régimen de

rugosidad aislado. El coeficiente de resistencia al flujo se determina comparando n_{IR} y n_{HT} , y siempre se va a ocupar el valor “n” más bajo (Khatsuria, 2006). Para lo cual se recomiendan las siguientes relaciones para determinar su valor:

1. $0.5 < L/D_i < 1.5$ (1.0 -1.1, recomendado)
2. $0.05 < L/D_i < 0.1$ (0.06 es recomendado para anillos disipadores)

Se determina la altura del anillo con la siguiente expresión:

$$h = \frac{D}{2 + \frac{1}{c}} \quad (61)$$

Donde:

- h altura del elemento de rugosidad
c constante de la relación h/D_i

3.1.5. Obras de disipación.

3.1.5.1. Estructura de disipación en el cauce.

Según Rodríguez (2008), Desde un punto de vista práctico, el resalto hidráulico es un medio útil para disipar el exceso de energía en un flujo supercrítico. Su mérito está en prevenir la posible erosión aguas abajo de vertederos de rebose, rápidas y compuertas deslizantes, debido a que reduce rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo.

El resalto hidráulico utilizado para la disipación de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación. En la práctica, el cuenco disipador rara vez se diseña para confinar toda la longitud de un resalto hidráulico libre sobre la zona revestida, debido a que sería muy costoso.

3.1.5.2. *Revestimiento con enrocado*

Los enrocados son protecciones en piedra o fragmentos de roca que se colocan en los cauces naturales, que sirve para proteger el canal de la erosión y conservar en especial los taludes de los efectos erosivos del agua.

Se selecciona este método de protección debido a la facilidad de su uso en el cauce del río existente.

Según Guevara (2013), el diámetro equivalente del enrocado está en función del peso, γ , peso específico de la roca. Y se lo puede determinar con la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt[3]{\frac{W}{0.5\gamma_p}} \quad (62)$$

Donde:

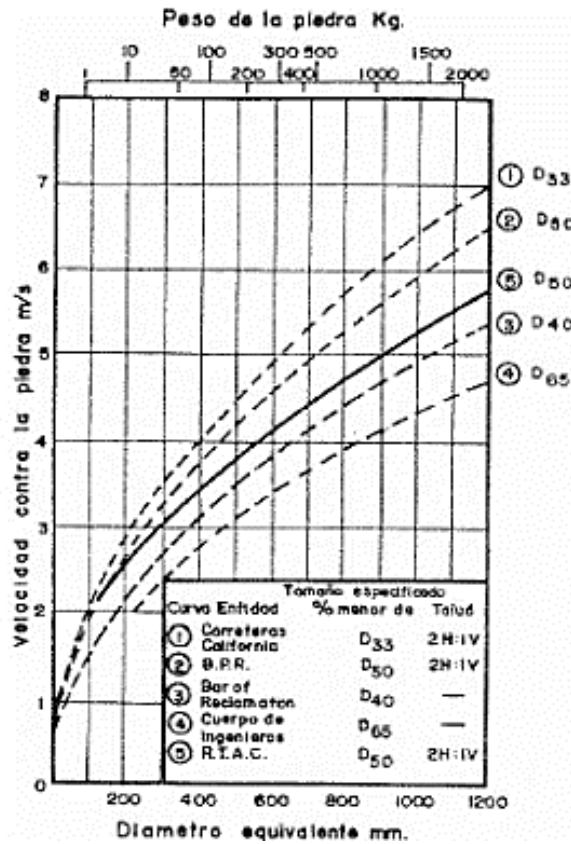
- D Diámetro del enrocado
- γ_p Peso específico de las piedras, recomendado 2400 kg/m³
- W Peso de la piedra

Existe un monograma que facilita la determinación del tamaño del enrocado de protección, el cual está en función de la velocidad media, diámetro equivalente y peso de la roca.

Se muestra a continuación:

Figura 29.

Gráfico para determinar el tamaño del enrocado de protección



Nota. Se observa los diferentes tipos de curvatura, para determinar el tamaño de la roca según la velocidad del flujo. Fuente: UNICAUCA (1991).

3.2. Simulación numérica con dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional, por sus siglas en inglés (CFD), consiste en la aplicación de técnicas numéricas para la resolución de fenómenos físicos que intervienen en el proceso de movimiento del fluido. Los programas creados para resolver las ecuaciones matemáticas, que expresan las leyes por las que se rigen los fluidos son capaces de ejecutar un gran número de cálculos por unidad de tiempo. (Fernández, 2012)

En otras palabras, se puede definir a la dinámica de fluidos computacional como una rama de la mecánica de fluidos que utiliza algoritmos basados en métodos numéricos para resolver las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos, de esta manera nos permite conocer de manera cualitativa y cuantitativa el comportamiento de los fluidos.

DNAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Mecánica de fluidos + Calculo numérico en Ordenadores

Según Fernández (2012) el solucionador resuelve de forma iterativa usando técnicas de relajación y así se obtiene la solución del problema físico simulado.

Los primeros estudios e investigaciones sobre modelación numérica de vertederos fueron desarrollados en 1965 por Cassidy, quien con un modelo numérico en dos dimensiones utilizó la suposición de flujo potencial para establecer la presión sobre la cresta de aliviadero. Se desarrollaron modelos numéricos multifásicos para un vertedero con paso escalonado, donde se recurrió a un índice de convergencia de la red para reducir el error de discretización. Los resultados numéricos se verificaron mediante de la comparación con el modelo físico a gran escala (Daneshkhah y Vosoughifar, 2011; Kositgittiwong, Chinnarasri y Julien, 2013)

La mecánica de fluidos computacional trabaja dividiendo el dominio de interés en una serie de pequeños volúmenes discretos usando una malla. Las propiedades físicas del fluido, tales como temperatura o velocidad y presión, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales (Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad Rioja, 2012),

3.2.1. ANSYS Workbench.

El software ANSYS Workbench es una de las herramientas más importantes para la resolución de sistemas, debido a la capacidad de realizar la geometría, mallado y cálculos de los mismos. El software está compuesto de varios módulos que sirven para diferentes aplicaciones tales, como análisis electromagnético, mecánico, térmico, mecánica de fluidos y sólidos.

Como se ha mencionado ANSYS Workbench tiene varios módulos para el análisis de fluidos, en este caso se utilizó el módulo ANSYS CFX para evaluar el funcionamiento de las obras de excesos de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal.

3.2.2. ANSYS CFX.

Es una herramienta de software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de alto rendimiento que ofrece soluciones fiables y precisas de forma rápida y robusta en una amplia gama de aplicaciones de CFD y multifásica. CFX es reconocido por su extraordinaria precisión, robustez y velocidad al simular turbo maquinaria, como bombas, ventiladores, compresores, turbinas de gas e hidráulicas y una infinidad de objetos y estructuras.

También se puede simular estructuras hidráulicas como canales, presas, disipadores de energía, redes de tuberías, etc. Y en este caso las obras de excesos del tanque de carga.

El software ANSYS CFX permite resolver las ecuaciones diferenciales en tres dimensiones, primero linealiza y como paso seguido encuentra ecuaciones algebraicas que definan su solución mediante un proceso iterativo, trabaja usando algoritmos para el contorno de un sólido y su resolución a través de elementos finitos (volúmenes finitos).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) está basada en la ecuación general de la conservación, de la cual se derivan tres principios fundamentales que son las ecuaciones que gobiernan el fluido incompresible que se describe a continuación:

- La conservación de la masa.
- La conservación de la cantidad de movimiento.
- La conservación de la energía.

3.2.3. Ecuación general de la conservación.

De manera general se obtiene una ecuación aplicable a un volumen de control (VC) partiendo del principio de conservación y considerando una variable específica ϕ sobre un volumen de control de dimensiones $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ así:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Incremento de } \phi \\ \text{en el volumen} \\ \text{de control} \\ \text{respecto al tiempo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Flujo neto de } \phi \\ \text{que entra} \\ \text{en el volumen} \\ \text{de control} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Generación neta de } \phi \\ \text{en el interior} \\ \text{del volumen de control} \\ \text{respecto al tiempo} \end{array} \right]$$

Además, Según Fernández (2012), teniendo en cuenta los dos mecanismos fundamentales de la generación de un flujo como son la: la convección, la cual asocia el fluido a nivel macroscópico y la difusión, originado a nivel molecular o microscópico podemos obtener en forma vectorial la ecuación general del movimiento como:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\nabla\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad (63)$$

Dónde:

$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$	Término temporal, variación local en el tiempo en el interior del VC.
$\nabla \cdot (\rho\nabla\phi)$	Término convectivo, transporte de la variante de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.
$\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)$	Término difusivo, fenómeno a nivel molecular, ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por efecto viscoso.
S	Término fuente, generación de la variable transportada.

A partir de la ecuación general de la conservación, se obtiene la ecuación de conservación de masa y la ecuación de cantidad de movimiento.

3.2.3.1. *Ecuación de conservación de la masa.*

Fernández (2012) afirma que en base al principio de conservación de masa que dice: la masa no se crea ni se destruye, sino se conserva, se obtiene la ecuación de conservación de la masa o también conocida como ecuación de continuidad que establece en forma general el incremento de masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento.

Para los casos prácticos de ingeniería hidráulica, el fluido es incompresible y la ecuación de continuidad se simplifica obteniendo así:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (64)$$

Para un fluido en general la ecuación tridimensional de continuidad no es estacionaria es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (65)$$

Por otra parte, la ecuación de conservación de la masa con la que trabaja el programa se deriva de aplicar la ley de conservación de la masa. Este principio se expresa como: el flujo neto másico de salida del volumen de control debe ser igual al incremento temporal de la masa anterior (J. Xaman, M. GijónRivera,2016).

La ecuación resultante es conocida como ecuación de conservación de masa, y se muestra a continuación:

$$V_c \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \xi \frac{\rho u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR}$$

(66)

Dónde:

V_C	Volumen de control
ρ	Densidad del Fluido
R_{DIF}	Difusión de masa por turbulencia
R_{SOR}	Fuente de masa

3.2.3.2. Ecuación de cantidad de movimiento.

Según Duran (2017), las fuerzas que actúan sobre un objeto determinan la cantidad de movimiento (segunda ley de Newton). Este principio se aplica a un volumen de fluido arbitrario.

$$\frac{d}{dt} \int_{V_f} \rho \vec{v} dV = \int_{V_f} \vec{f}_v dV + \int_{S_f} \vec{f}_n dS \quad (67)$$

Dónde:

\vec{f}_v	Fuerza por unidad de volumen
\vec{f}_n	Fuerza por unidad de superficie

Derivada de la segunda Ley de Newton, Se relaciona la cantidad de movimiento lineal del fluido con las fuerzas que actúan sobre él y normalmente se utiliza para calcular las interacciones de fuerza entre un fluido en movimiento y su el contacto con objetos sólidos. (Tejeida,2002). La ecuación general de movimiento para un fluido newtoniano que presenta variación de la densidad y la viscosidad es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \rho v v] - \nabla \rho - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (68)$$

Dónde: τ es el tensor de esfuerzos, g la constante de aceleración gravitacional.

Cuando la densidad y la viscosidad son constantes, la ecuación anterior se simplifica obteniendo la ecuación de Navier-Stokes.

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (69)$$

En dinámica de fluidos, las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones que describen el movimiento tridimensional de sustancias fluidas viscosas. Estas ecuaciones llevan el nombre de Claude-Louis Navier (1785-1836) y George Gabriel Stokes (1819-1903). En situaciones en las que no hay fuertes gradientes de temperatura en el fluido, estas ecuaciones proporcionan una muy buena aproximación de la realidad.

Dónde:

- $\rho \frac{Dv}{Dt}$ La derivada del cambio de velocidad con respecto al tiempo.
- $-\nabla p$ La Gradiente de presión.
- $\mu \nabla^2 v$ Término de difusión: Para un fluido newtoniano, la viscosidad opera como una difusión de momento.
- ρg Fuerzas externas que actúan sobre el fluido (gravedad).

Como se puede ver, las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales no lineales de segundo orden.

Dónde:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (70)$$

Igualando las ecuaciones tenemos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (71)$$

Y cuando los efectos viscosos son poco importantes, se convierte en la siguiente ecuación, conocida como (ecuación de Euler).

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \rho g \quad (72)$$

Aunque las ecuaciones de Navier-Stokes tienen solo un número limitado de soluciones analíticas conocidas, son susceptibles de modelado computarizado de cuadrícula final. La herramienta principal disponible para su análisis es el análisis CFD, debido a que permite analizar problemas que involucran flujos de fluidos turbulentos.

3.2.3.3. Ecuación de la energía.

La ecuación de la energía es derivada de la primera ley de la termodinámica, la cual establece que la cantidad de cambio de energía de una partícula es igual a la cantidad de calor adicionado al elemento más la cantidad de trabajo realizada sobre la partícula. (J. Xaman, M. Gijón-Rivera, 2016) Para fluidos incompresibles o térmicos, la ecuación de la energía interna es:

$$V_C \frac{\partial}{\partial t} (\rho l) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho l_u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho l_v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho l_w A_z) + \xi \frac{\rho l_w A_x}{x} = -p \left\{ \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} \right\} + \xi \frac{u A_x}{x} \} + RI_{DIF} + T_{DIF} + RI_{SOR} \quad (73)$$

El término RI_{DIF} es la mezcla de energía macroscópica, es la difusión por turbulencia de la energía interna y el término T_{DIF} por la transferencia de calor, estos términos se definen en las siguientes ecuaciones:

$$RI_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_1 A_x \frac{\partial \rho l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_1 A_y R \frac{\partial \rho l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_1 A_z \frac{\partial \rho l}{\partial z} \right) + \xi \frac{u_v A_x \rho l}{x} \quad (74)$$

$$T_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k A_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(k A_y R \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k A_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \xi \frac{k A_x T}{x} \quad (75)$$

3.2.4. Discretización espacial.

Es el primer paso para la aplicación de la CFD, existen varios métodos para la discretización del problema, como por ejemplo el método de volúmenes finito. Los métodos requieren una previa discretización geométrica (espacial) para poder realizar la discretización las ecuaciones que gobiernan el fluido. Existen dos tipos de mallado:

- Mallado estructurado.
- Mallado no estructurado.

3.2.4.1. *Mallas estructuradas.*

Es el mallado que tiene todos los elementos del mismo tamaño, La principal ventaja de este mallado reside en la ordenación de los elementos en memoria, ya que, de esta forma, el acceso a las celdas vecinas resulta muy rápido y sencillo, sin más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente. Cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices i, j, k , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D.

3.2.4.2. *Mallas no estructuradas.*

Son los mallados que tienen diferentes formas de elementos finitos como pirámides, triángulos, hexaedros, etc. Este mallado ofrece una gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas. Su ventaja es que los triángulos 2-D y los tetraedros 3-D se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, los nodos cercanos a uno dado no pueden identificarse directamente por sus índices en este caso son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D.

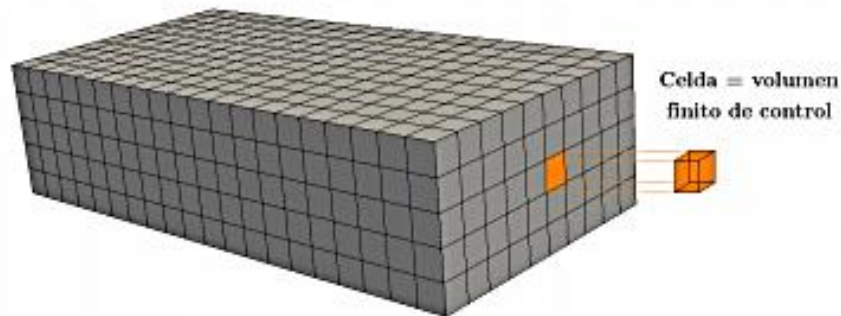
3.2.5. Método de volúmenes finitos. –

Cuando se quiere obtener una solución a problemas complejos se acude a los métodos numéricos: Método de elementos finitos (MEF) o método de volúmenes finitos (MVF). El método de los volúmenes finitos emplea directamente las ecuaciones de conservación en su forma integral.

Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio. La ventaja principal de este método es que discretiza el dominio del fluido y no discretiza el dominio del sólido, además que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema.

Figura 30.

Representación de un dominio discretizado con el método de volúmenes finitos



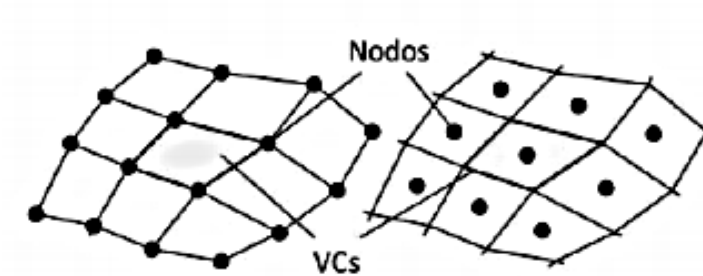
Nota. Se observa la muestra del mallado de un sólido. Fuente: Adriana López, Numerical solution of the Navier-Stokes equations

La modelación numérica de fenómenos hidrodinámicos conlleva a la resolución de las ecuaciones de la conservación de la masa, de la cantidad de movimiento, de la conservación de la energía y de Navier-Stokes gobernantes para fluidos.

En el método de los volúmenes finitos el dominio es subdividido en un número finito de volúmenes de control y las ecuaciones de control son aplicadas a cada uno de ellos. En cada volumen se toma como referencia el centroide para realizar los cálculos de las variables como son presión, temperatura, velocidad, etc., y por medio de la interpolación se puede calcularlas en las fronteras de cada volumen. Durán (2017).

Figura 31.

Nodos y volúmenes de control. Izquierda MEF. Derecha MVF



Nota. Se observa a la Izquierda MEF. Derecha MVF. Fuente: Adriana López, Numerical solution of the Navier-Stokes equations

3.2.6. Modelos de turbulencia.

Se utiliza para calcular la viscosidad turbulenta efectiva en un sistema de fluidos según el modelo de viscosidad de remolino. Para lo cual existen varios métodos: Algebraic yPlus, L-VEL, $k-\omega$, SST, V2-f, Spalart-Allmaras, Low Re $k-\epsilon$, $k-\epsilon$ estándar, y Modelo $k-\epsilon$ de grupo de re normalización (RNG). Este último, es el método utilizado para la resolución de este proyecto.

3.2.6.1. Modelo k-epsilon de grupo de renormalización (RNG)

Para el análisis y resolución del programa Ansys Flow CFX se tomó en cuenta el modelo de turbulencia RNG k-ε, este modelo es similar al estándar, pero con una expresión que implica dos constantes utilizadas para modificar el término RNG.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \Omega(t) \rho \varepsilon d\Omega + \int \sigma \rho ((v - v_\sigma) \cdot n) \varepsilon d\sigma = \int \sigma \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) (\nabla \varepsilon \cdot n) d\sigma + \int \Omega \left(c_1 G_t \frac{\varepsilon}{k} - \right.$$

$$\left. c_2 (RNG) \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \right) d\Omega$$

$$c_2 (RNG) = c_2 + \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3}$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{P}$$

Dónde:

$$\eta_0 = 4.38$$

-Constante RNG

$$\beta = 1.92$$

-Constante RNG

$$k = \frac{1}{2} (v' \cdot v')$$

-Energía cinética turbulenta.

$$v'$$

-Velocidad de fluctuación turbulenta

$$S'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x'_i} \right)$$

-Velocidad de disipación de energía

turbulenta

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

-Tensor de deformación.

$$G_t = -\rho u'_i u'_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

-Velocidad turbulenta, con Cu=0.09

$$\tau'_{ij} = -\rho u'_i u'_j$$

-Término de generación de turbulencia

$$\tau'_{ij} = -\mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \cdot \delta_{ij}$$

-Tensión de Reynolds de turbulencia,

aproximación de Boussinesq a la

tensión de Reynolds

3.2.7. Etapas de la modelación numérica.

3.2.7.1. *Pre-Proceso.*

Es la etapa de la preparación de datos de entrada en un código de resolución. En esta etapa se define una geometría o dominio computacional, se genera una malla numérica adecuada, se especifica los fenómenos físicos que se pretenden modelar, además las propiedades físicas del medio y condiciones iniciales y de frontera (J Xaman, M Gijon Rivera, 2016).

3.2.7.2. *Solución de las Ecuaciones.*

Esta es la etapa principal del CFD constituye la parte central del software. En ella se da lugar a la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema, estas se discretizan y linealizan, obteniendo un sistema de ecuaciones algebraico que finalmente se resuelve de forma iterativa para obtener un campo vectorial dinámico de fluido. (Fernández Oro J. M., 2012).

Estabilidad y convergencia numérica. – Es una etapa del procesamiento del software ANSYS-CFX, donde resuelven las ecuaciones: de continuidad, de cantidad de movimiento, de conservación de energía, de la disipación turbulenta y de la energía cinética, para lo cual el programa genera graficas que vienen a ser monitores de convergencia del análisis requerido (Lluguay, 2016).

El paquete de la CFD se corre hasta lograr la convergencia (que los residuos se estabilicen). Recuerde que un residuo es una medida de la que tanto se desvía la solución numérica de la ecuación dada el valor exacto de la solución; a menor residuo, mejor convergencia (Lluguay, 2016).

Un método numérico es estable cuando el proceso iterativo converge mientras se califica como inestable cuando diverge. Según Blazek (2005), la estabilidad domina el diseño de cualquier

algoritmo computacional, sin embargo, es difícil deducir la inestabilidad de un algoritmo sin las prestaciones de un computador.

3.2.7.3. *Post-Proceso.* -

Finalmente, en el análisis de resultados es de suma importancia la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, mapas de contornos, vectores de velocidades, presiones, etc. de esta manera se tiene una visión rápida de los resultados ya que la cantidad de información obtenida en un proceso de simulación puede ser grande (Torres Cámara & Grau Barceló, 2007).

Existen métodos con los que el programa simula el flujo, uno de los más comunes y que tiene convergencia con las ecuaciones de Navier-Stokes antes mencionadas es el método de volúmenes finitos

3.2.7.4. *Residuos y convergencia.*

A través de una manera iterativa, CFX lleva a la solución verificando un criterio de convergencia. Cada proceso debe converger hacia una solución, por lo tanto, cada iteración es una solución próxima a la solución real.

Los denominados "residuos" son una herramienta para controlar la convergencia, esto significa que cuando un sistema tiende a converger los residuos disminuyen progresivamente, mientras que si los residuos aumentan es posible que no converja.

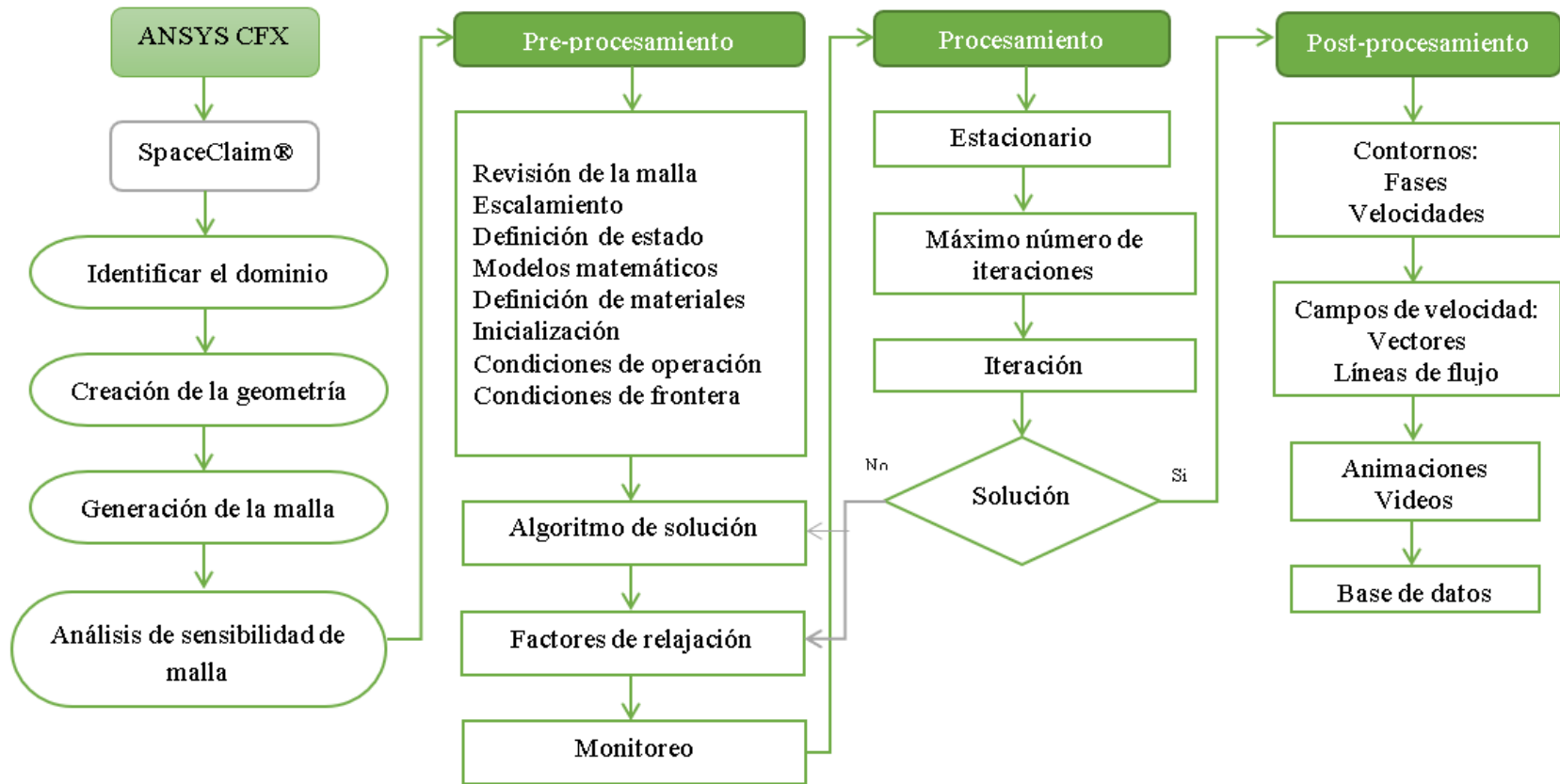
Cfx calcula una solución para cada paso de tiempo, por lo tanto, se tendrá una evolución de residuos que comenzará en el siguiente paso de tiempo. El criterio de convergencia es el requisito que impone el usuario para determinar la calidad de simulación, para esto se limitan los residuos a valores aceptables, esto es que a cada variable se le asigna un residuo máximo, al

comenzar el proceso iterativo siendo los residuos más inferiores por lo que se puede decir que el código ha convergido bajo ciertos criterios. Duran (2017).

Una vez definidas las etapas de la modelación, presentamos un resumen de las mismas por medio de un algoritmo gráfico.

Figura 32.

Algoritmo de las etapas de la modelación numérica



Nota. Se observa el proceso interno del software. Elaborado por: Los autores.

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN HIDRÁULICAS DE LAS OBRAS DE EXCESOS EXISTENTES

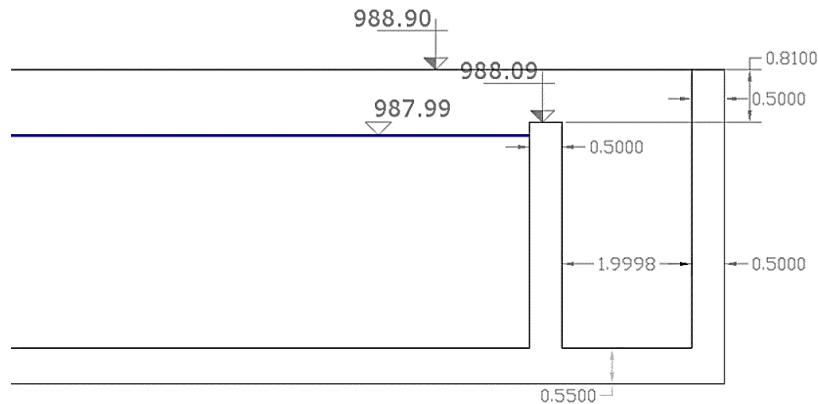
En este capítulo se evaluará las obras de excesos del tanque de carga que están construidas actualmente, mediante la evaluación analítica, es decir con la aplicación de fórmulas matemáticas derivadas de modelos experimentales de la hidráulica tradicional.

4.1. Evaluación de la capacidad del vertedero de excesos

Este vertedero forma parte del tanque de carga de la central hidroeléctrica, se consideró los datos iniciales: el caudal de diseño (Q_{dis}) y las dimensiones del vertedero visualizadas en el plano: frente del vertedero (B), espesor (e), y altura del vertedero (c).

Figura 33.

Corte del vertedero de excesos del tanque de carga



Nota. Se observa el tanque con sus respectivas dimensiones. Fuente: Planos As Built CEM Palmira-Nanegal

Tabla 1.*Datos del vertedero de excesos.*

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal de diseño	Qdis	13	m ³ /s
Altura del vertedero	c	3,47	m
Frente del vertedero	B	36,1	m
Espesor del vertedero	e	0,5	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

4.1.1. Tipo de vertedero.

Conocidos los datos, se debe verificar el funcionamiento del vertedero. Realizando un proceso iterativo por medio de la ecuación general del vertedero se encontró la carga de agua del vertedero (H_o).

$$H_o = 0,341 \text{ m}$$

Sotelo propone que, si la relación entre el espesor del vertedero y la carga específica de agua es menor a 0,67 se considera vertedero de pared delgada caso contrario se considera vertedero de pared ancha.

$$e/H_o = 1,47$$

$$e/H_o > 0.67$$

De la relación e/H_o , se determinó que trabaja como vertedero de pared ancha. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 2.*Determinación de los parámetros hidráulicos del vertedero de excesos.*

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Carga de total del vertedero	H	0,34	m
Velocidad de acercamiento	V _o	0,09	m/s

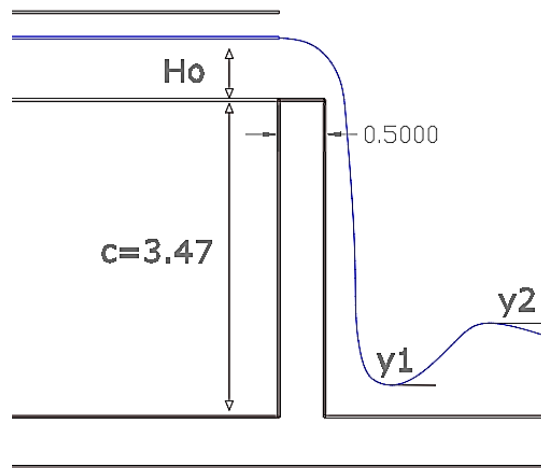
Energía específica	E_o	3,81	m
Profundidad crítica	y_c	0,24	m
Primera conjugada del resalto	y_1	0,04	m
Segunda conjugada del resalto	y_2	0,75	m

Nota: En la tabla se describe los parámetros hidráulicos con valores, unidades y símbolos.

Elaborado por: Los autores.

Figura 34.

Esquema del vertedero de excesos del tanque de carga.



Nota. Se observa el vertedero con sus parámetros. Elaborado por: Los autores.

Del funcionamiento del vertedero, se estableció que la carga de agua (H_o) es adecuada para evacuar el caudal de $13 \text{ m}^3/\text{s}$, Además, se determinó el borde libre en condiciones de operación normal (t) es de 47 cm , el cual es apropiado, ya que es mayor que la carga de velocidad ($v^2/2g$) igual a 0.4 mm .

De la tabla 4-2, se concluyó que los parámetros del resalto cumplen un funcionamiento adecuado, debido a que la segunda conjugada es mucho menor a la altura del canal, por ello

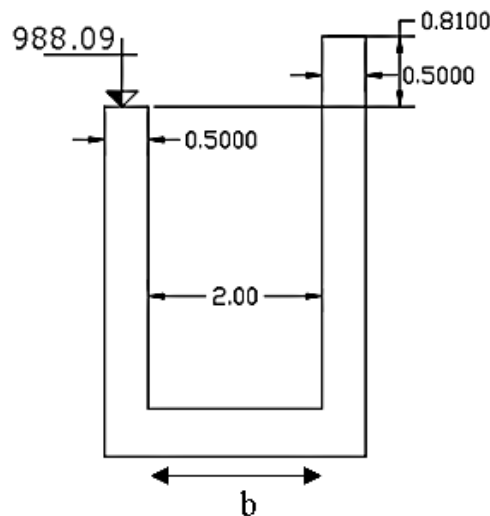
justifica que la altura del canal es suficiente, ya que no existe sobrevertido del flujo. Cabe mencionar que existe turbulencia en el canal de recolección.

4.2. Análisis del flujo espacialmente variado en el canal de recolección

Para encontrar el perfil de flujo espacialmente variado del canal de recolección, para flujos de mayor complejidad como en este caso, Ven Te Chow, 2004 propone usar el método de integración numérica para caudal creciente. La geometría del canal es la siguiente:

Figura 35.

Perfil de corte del canal de recolección.



Nota. Se observa los parámetros del canal de recolección. Elaborado por: Los autores.

4.2.1. Perfil de flujo espacialmente variado.

Antes de determinar el perfil de flujo se debe calcular la sección de control, para ello se utiliza como apoyo una tabla de profundidades críticas, conocido el caudal de diseño (Q_{dis}) y la base del canal (b) se procede a determinar sus parámetros correspondientes como caudal crítico, velocidad crítica y radio hidráulico crítico.

La tabla de profundidades críticas nos permite, mediante interpolaciones encontrar los parámetros antes mencionados para cada profundidad crítica necesaria.

Para determinar la sección de control, se grafica la caída acumulada en la superficie de agua para flujo crítico considerando la variación de caudal creciente, la sección de control se encuentra en el punto de tangencia entre la pendiente del fondo del canal y la línea de profundidades críticas.

Tabla 3.

Cálculo de las profundidades críticas

yc (m)	A (m²)	T (m)	P (m)	A/2T (m)	Vc (m/s)	Qc (m³/s)	Rc (m)
0,05	0,1	2	2,1	0,1	0,70	0,07	0,04
0,1	0,2	2	2,2	0,2	0,99	0,19	0,09
0,15	0,3	2	2,3	0,3	1,21	0,36	0,13
0,2	0,4	2	2,4	0,4	1,40	0,56	0,16
...
...
1.8	3.6	2	5.6	3.6	4.20	15.13	0.64

Nota: ejemplo de cálculo de profundidades críticas. Elaborado por: Los autores.

La tabla 3 muestra los cálculos de las velocidades y caudales críticos correspondientes a un número de profundidades arbitrariamente asignadas, los radios críticos también se calculan y se registran en esta tabla para calcular las pérdidas por fricción.

Tabla 4.

Cálculo para la determinación de la sección de control

X (m)	Q (m³/s)	Q1+Q2 (m³/s)	Yc (m)	Vc (m/s)	V1+V2 (m/s)	ΔQ (m³/s)	ΔV (m/s)	Ym' (m)	Rc (m)	hf -	Δy' (m)	ΣΔy' (m)
0,5	0,18	0,18	0,09	0,94	0,95	-	0,95	-	0,084	0,0021	-	-

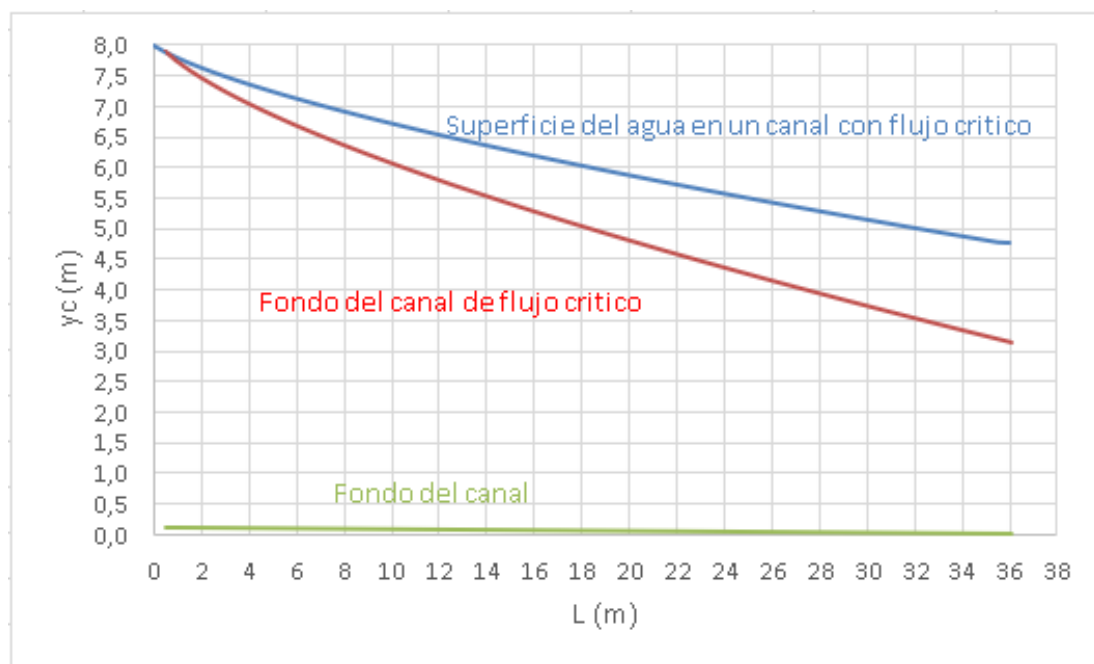
1	0,36	0,54	0,14	1,21	2,16	0,18	0,26	0,11	0,13	0,0020	0,11	0,11
1,5	0,54	0,90	0,19	1,38	2,59	0,18	0,17	0,091	0,16	0,0019	0,09	0,20
2	0,72	1,26	0,23	1,52	2,90	0,18	0,14	0,082	0,19	0,0018	0,08	0,29
2,5	0,91	1,62	0,27	1,64	3,16	0,18	0,12	0,075	0,21	0,0018	0,07	0,36
...
...
36,1	13	25,96	1,62	3,99	7,99	0,04	0,003	0,0060	0,62	0,0026	0,008	3,22

Nota: ejemplo de cálculo para la determinación de la sección de control. Elaborado por: Los autores.

La tabla 4 muestra el cálculo de la caída en la superficie de agua para mantener un flujo con profundidad crítica a lo largo de toda la longitud del canal.

Figura 36.

Curva de profundidades críticas y fondo del canal



Nota. Se muestra la tangencia de las curvas del canal. Elaborado por: Los autores.

Como se puede observar en la figura 36, la línea paralela al fondo del canal no muestra un punto de tangencia con la curva del canal ficticio de flujo crítico, por ello se determina que la sección de control se encuentra en una distancia mucho mayor a los 36.1 m, también se conoce que a esta distancia el canal sufre un cambio brusco de pendiente que genera un resalto hidráulico, aquí se localiza un calado crítico (y_c), el cual se escogió como sección de control y punto de inicio para determinar el perfil de flujo.

Tabla 5.*Calculo para la determinación del perfil de flujo.*

x	Δx	Zo	$\Delta y'$	Z	y	A	Q	V	Q1 + Q2	V1 + V2	ΔQ	ΔV	$\Delta ym'$	R	hf	$\Delta y'cal$
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m ³ /s)	(m/s)	(m ³ /s)	(m/s)	(m ³ /s)	(m/s)	(m)	(m)	-	(m)
Flujo subcrítico, cálculo mediante pasos en la dirección hacia aguas abajo																
36,1	0	984,69	0	986,32	1,63	3,26	13	3,988	-	-	-	-	-	-	-	-
36	0,1	984,69	0,07850	986,40	1,71	3,42	12,96	3,79	25,96	7,78	0,04	0,19	0,0809	0,62	0,0023503	0,0785
35,5	0,5	984,69	0,14022	986,54	1,85	3,69	12,78	3,46	25,75	7,26	0,18	0,33	0,1421	0,62	0,0018834	0,1402
35	0,5	984,69	0,07807	986,62	1,92	3,85	12,60	3,28	25,39	6,74	0,18	0,18	0,0797	0,61	0,0016567	0,0781
34,5	0,5	984,70	0,05993	986,68	1,98	3,96	12,42	3,13	25,03	6,41	0,18	0,14	0,0614	0,61	0,0014961	0,0599
34	0,5	984,70	0,05005	986,73	2,03	4,06	12,24	3,02	24,67	6,15	0,18	0,12	0,0514	0,61	0,0013698	0,0500
33,5	0,5	984,70	0,04356	986,77	2,07	4,14	12,06	2,91	24,31	5,93	0,18	0,10	0,0448	0,61	0,0012652	0,0436
33	0,5	984,70	0,03887	986,81	2,11	4,22	11,88	2,82	23,95	5,73	0,18	0,09	0,0400	0,61	0,0011756	0,0389
32,5	0,5	984,70	0,03527	986,84	2,14	4,29	11,70	2,73	23,59	5,55	0,18	0,09	0,0364	0,60	0,0010973	0,0353
32	0,5	984,70	0,03237	986,88	2,17	4,35	11,52	2,65	23,23	5,38	0,18	0,08	0,0334	0,60	0,0010278	0,0324
31,5	0,5	984,71	0,02999	986,91	2,20	4,40	11,34	2,58	22,87	5,23	0,18	0,08	0,0310	0,60	0,0009652	0,0300
31	0,5	984,71	0,02797	986,93	2,23	4,46	11,16	2,51	22,51	5,08	0,18	0,07	0,0289	0,60	0,0009083	0,0280
30,5	0,5	984,71	0,02623	986,96	2,25	4,51	10,98	2,44	22,15	4,94	0,18	0,07	0,0271	0,59	0,0008563	0,0262
30	0,5	984,71	0,02470	986,99	2,28	4,55	10,80	2,37	21,79	4,81	0,18	0,06	0,0255	0,59	0,0008084	0,0247
29,5	0,5	984,71	0,02336	987,01	2,30	4,60	10,62	2,31	21,43	4,69	0,18	0,06	0,0241	0,59	0,0007640	0,0234
29	0,5	984,71	0,02215	987,03	2,32	4,64	10,44	2,25	21,07	4,56	0,18	0,06	0,0229	0,58	0,0007227	0,0221
28,5	0,5	984,71	0,02106	987,05	2,34	4,67	10,26	2,20	20,71	4,45	0,18	0,06	0,0217	0,58	0,0006841	0,0211
28	0,5	984,72	0,02007	987,07	2,36	4,71	10,08	2,14	20,35	4,34	0,18	0,06	0,0207	0,58	0,0006480	0,0201
27,5	0,5	984,72	0,01916	987,09	2,37	4,75	9,90	2,09	19,99	4,23	0,18	0,05	0,0198	0,58	0,0006141	0,0192
27	0,5	984,72	0,01833	987,11	2,39	4,78	9,72	2,03	19,63	4,12	0,18	0,05	0,0189	0,57	0,0005821	0,0183
26,5	0,5	984,72	0,01755	987,13	2,41	4,81	9,54	1,98	19,27	4,02	0,18	0,05	0,0181	0,57	0,0005519	0,0176
26	0,5	984,72	0,01683	987,14	2,42	4,84	9,36	1,93	18,91	3,92	0,18	0,05	0,0174	0,57	0,0005233	0,0168
25,5	0,5	984,72	0,01616	987,16	2,44	4,87	9,18	1,89	18,55	3,82	0,18	0,05	0,0167	0,56	0,0004963	0,0162
25	0,5	984,73	0,01552	987,18	2,45	4,90	9,00	1,84	18,19	3,72	0,18	0,05	0,0160	0,56	0,0004706	0,0155

x	Δx	Zo	$\Delta y'$	Z	y	A	Q	V	Q1 + Q2	V1 + V2	ΔQ	ΔV	$\Delta ym'$	R	hf	$\Delta y'cal$
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m2)	(m3/s)	(m/s)	(m3/s)	(m/s)	(m3/s)	(m/s)	(m)	(m)	-	(m)
24,5	0,5	984,73	0,01493	987,19	2,46	4,93	8,82	1,79	17,83	3,63	0,18	0,05	0,0154	0,56	0,0004461	0,0149
24	0,5	984,73	0,01436	987,21	2,48	4,95	8,64	1,75	17,47	3,54	0,18	0,05	0,0148	0,55	0,0004229	0,0144
23,5	0,5	984,73	0,01383	987,22	2,49	4,98	8,46	1,70	17,11	3,45	0,18	0,04	0,0142	0,55	0,0004007	0,0138
23	0,5	984,73	0,01332	987,23	2,50	5,00	8,28	1,66	16,75	3,36	0,18	0,04	0,0137	0,55	0,0003796	0,0133
22,5	0,5	984,73	0,01284	987,25	2,51	5,02	8,10	1,61	16,39	3,27	0,18	0,04	0,0132	0,54	0,0003594	0,0128
22	0,5	984,74	0,01238	987,26	2,52	5,04	7,92	1,57	16,02	3,18	0,18	0,04	0,0127	0,54	0,0003402	0,0124
21,5	0,5	984,74	0,01194	987,27	2,53	5,06	7,74	1,53	15,66	3,10	0,18	0,04	0,0123	0,54	0,0003217	0,0119
21	0,5	984,74	0,01151	987,28	2,54	5,08	7,56	1,49	15,30	3,02	0,18	0,04	0,0118	0,53	0,0003041	0,0115
20,5	0,5	984,74	0,01111	987,29	2,55	5,10	7,38	1,45	14,94	2,93	0,18	0,04	0,0114	0,53	0,0002873	0,0111
20	0,5	984,74	0,01071	987,30	2,56	5,12	7,20	1,41	14,58	2,85	0,18	0,04	0,0110	0,52	0,0002711	0,0107
19,5	0,5	984,74	0,01033	987,31	2,57	5,14	7,02	1,37	14,22	2,77	0,18	0,04	0,0106	0,52	0,0002557	0,0103
19	0,5	984,75	0,00997	987,32	2,58	5,15	6,84	1,33	13,86	2,69	0,18	0,04	0,0102	0,51	0,0002409	0,0100
18,5	0,5	984,75	0,00961	987,33	2,59	5,17	6,66	1,29	13,50	2,62	0,18	0,04	0,0098	0,51	0,0002267	0,0096
18	0,5	984,75	0,00927	987,34	2,59	5,19	6,48	1,25	13,14	2,54	0,18	0,04	0,0095	0,51	0,0002131	0,0093
17,5	0,5	984,75	0,00894	987,35	2,60	5,20	6,30	1,21	12,78	2,46	0,18	0,04	0,0091	0,50	0,0002001	0,0089
17	0,5	984,75	0,00861	987,36	2,61	5,21	6,12	1,17	12,42	2,39	0,18	0,04	0,0088	0,50	0,0001876	0,0086
16,5	0,5	984,75	0,00829	987,37	2,61	5,23	5,94	1,14	12,06	2,31	0,18	0,04	0,0085	0,49	0,0001757	0,0083
16	0,5	984,76	0,00799	987,38	2,62	5,24	5,76	1,10	11,70	2,24	0,18	0,04	0,0082	0,49	0,0001643	0,0080
15,5	0,5	984,76	0,00769	987,38	2,63	5,25	5,58	1,06	11,34	2,16	0,18	0,04	0,0078	0,48	0,0001533	0,0077
15	0,5	984,76	0,00739	987,39	2,63	5,26	5,40	1,03	10,98	2,09	0,18	0,04	0,0075	0,48	0,0001428	0,0074
14,5	0,5	984,76	0,00710	987,40	2,64	5,27	5,22	0,99	10,62	2,02	0,18	0,04	0,0072	0,47	0,0001328	0,0071
14	0,5	984,76	0,00682	987,40	2,64	5,29	5,04	0,95	10,26	1,94	0,18	0,04	0,0069	0,46	0,0001232	0,0068
13,5	0,5	984,76	0,00655	987,41	2,65	5,30	4,86	0,92	9,90	1,87	0,18	0,04	0,0067	0,46	0,0001141	0,0065
13	0,5	984,77	0,00628	987,42	2,65	5,30	4,68	0,88	9,54	1,80	0,18	0,04	0,0064	0,45	0,0001054	0,0063
12,5	0,5	984,77	0,00601	987,42	2,66	5,31	4,50	0,85	9,18	1,73	0,18	0,04	0,0061	0,45	0,0000970	0,0060
12	0,5	984,77	0,00575	987,43	2,66	5,32	4,32	0,81	8,82	1,66	0,18	0,04	0,0058	0,44	0,0000891	0,0057
11,5	0,5	984,77	0,00549	987,43	2,66	5,33	4,14	0,78	8,46	1,59	0,18	0,03	0,0056	0,43	0,0000815	0,0055

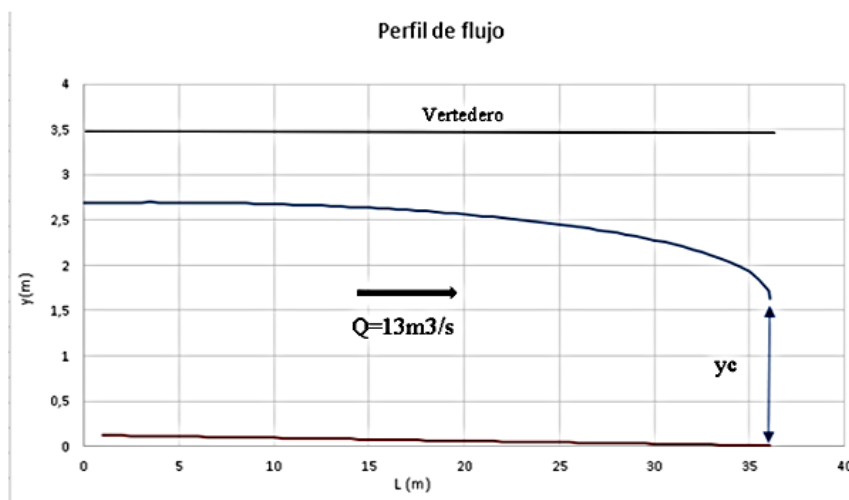
x (m)	Δx (m)	Zo (m)	$\Delta y'$ (m)	Z (m)	y (m)	A (m ²)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Q1 + Q2 (m ³ /s)	V1 + V2 (m/s)	ΔQ (m ³ /s)	ΔV (m/s)	$\Delta ym'$ (m)	R (m)	hf -	$\Delta y'cal$ (m)
11	0,5	984,77	0,00523	987,44	2,67	5,34	3,96	0,74	8,10	1,52	0,18	0,03	0,0053	0,42	0,0000744	0,0052
10,5	0,5	984,77	0,00498	987,45	2,67	5,34	3,78	0,71	7,74	1,45	0,18	0,03	0,0051	0,42	0,0000676	0,0050
10	0,5	984,78	0,00474	987,45	2,67	5,35	3,60	0,67	7,38	1,38	0,18	0,03	0,0048	0,41	0,0000611	0,0047
9,5	0,5	984,78	0,00449	987,45	2,68	5,35	3,42	0,64	7,02	1,31	0,18	0,03	0,0045	0,40	0,0000550	0,0045
9	0,5	984,78	0,00425	987,46	2,68	5,36	3,24	0,60	6,66	1,24	0,18	0,03	0,0043	0,39	0,0000493	0,0042
8,5	0,5	984,78	0,00401	987,46	2,68	5,36	3,06	0,57	6,30	1,18	0,18	0,03	0,0041	0,38	0,0000439	0,0040
8	0,5	984,78	0,00377	987,47	2,68	5,37	2,88	0,54	5,94	1,11	0,18	0,03	0,0038	0,37	0,0000388	0,0038
7,5	0,5	984,78	0,00354	987,47	2,69	5,37	2,70	0,50	5,58	1,04	0,18	0,03	0,0036	0,36	0,0000340	0,0035
7	0,5	984,79	0,00330	987,47	2,69	5,38	2,52	0,47	5,22	0,97	0,18	0,03	0,0033	0,35	0,0000296	0,0033
6,5	0,5	984,79	0,00307	987,48	2,69	5,38	2,34	0,44	4,86	0,90	0,18	0,03	0,0031	0,34	0,0000255	0,0031
6	0,5	984,79	0,00284	987,48	2,69	5,38	2,16	0,40	4,50	0,84	0,18	0,03	0,0029	0,33	0,0000217	0,0028
5,5	0,5	984,79	0,00261	987,48	2,69	5,38	1,98	0,37	4,14	0,77	0,18	0,03	0,0026	0,32	0,0000182	0,0026
5	0,5	984,79	0,00238	987,48	2,69	5,38	1,80	0,33	3,78	0,70	0,18	0,03	0,0024	0,30	0,0000150	0,0024
4,5	0,5	984,79	0,00215	987,49	2,69	5,39	1,62	0,30	3,42	0,64	0,18	0,03	0,0022	0,29	0,0000122	0,0022
4	0,5	984,79	0,00193	987,49	2,69	5,39	1,44	0,27	3,06	0,57	0,18	0,03	0,0019	0,27	0,0000096	0,0019
3,5	0,5	984,80	0,00170	987,49	2,69	5,39	1,26	0,23	2,70	0,50	0,18	0,03	0,0017	0,26	0,0000074	0,0017
3	0,5	984,80	0,00147	987,49	2,69	5,39	1,08	0,20	2,34	0,43	0,18	0,03	0,0015	0,24	0,0000054	0,0015
2,5	0,5	984,80	0,00125	987,49	2,69	5,39	0,90	0,17	1,98	0,37	0,18	0,03	0,0013	0,21	0,0000038	0,0012
2	0,5	984,80	0,00102	987,49	2,69	5,38	0,72	0,13	1,62	0,30	0,18	0,03	0,0010	0,19	0,0000024	0,0010
1,5	0,5	984,80	0,00080	987,49	2,69	5,38	0,54	0,10	1,26	0,23	0,18	0,03	0,0008	0,16	0,0000014	0,0008
1	0,5	984,80	0,00057	987,50	2,69	5,38	0,36	0,07	0,90	0,17	0,18	0,03	0,0006	0,13	0,0000006	0,0006
0,5	0,5	984,81	0,00034	987,50	2,69	5,38	0,18	0,03	0,54	0,10	0,18	0,03	0,0003	0,08	0,0000002	0,0003
0	0,5	984,81	0,00011	987,50	2,69	5,37	0,00	0,00	0,18	0,03	0,18	0,03	0,0001	0,00	0,00	0,0001

Nota: En la tabla se describe los términos para el cálculo del perfil de flujo con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores.

En la tabla 5, se muestra el cálculo de perfil de flujo espacialmente variado a lo largo del canal correspondiente a 36.1 m de longitud, los cálculos se los realiza por medio de un proceso iterativo y proceden hacia aguas arriba desde la sección de control conocida, para el flujo subcrítico en la parte superior del canal.

Figura 37.

Perfil de flujo del canal de recolección con flujo espacialmente variado



Nota. El caudal representado en la figura corresponde al caudal creciente al final del vertedero.

Elaborador por: Los autores.

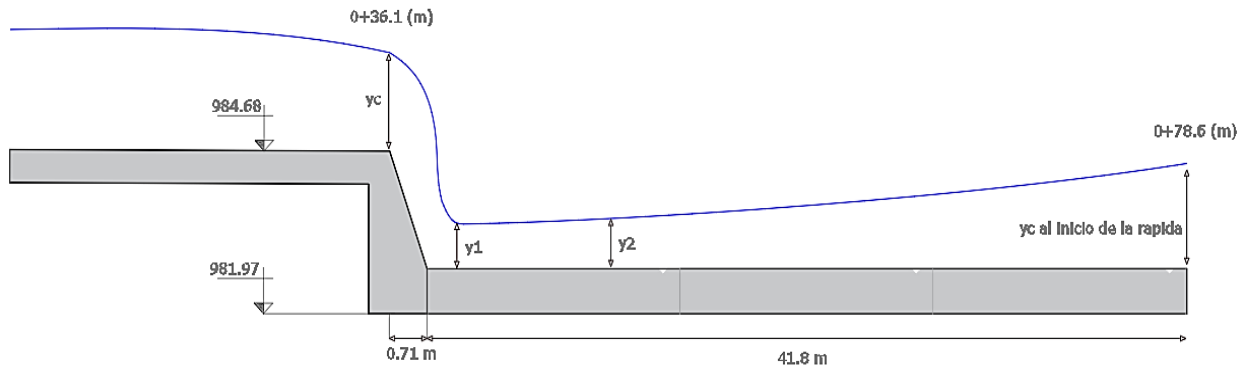
En la figura 37 se visualiza el perfil de flujo correspondiente a 36.1 m de longitud, mediante una curva del flujo espacialmente variado.

4.3. Análisis del flujo gradualmente variado en el canal de conducción

A los 36.1 m, en la segunda parte del canal de conducción se encuentra un salto negativo cuya altura de caída de agua es de 1.97 m, la longitud del canal de conducción es 41.8 m.

Figura 38.

Esquema del canal con flujo espacialmente variado



Nota. El gráfico muestra los parámetros del salto entre el canal de recolección y el canal de conducción de excesos. Elaborado por: Los autores.

Primero se calcula los parámetros del resalto hidráulico, y para ello se utilizan las ecuaciones del resalto mencionadas anteriormente.

Tabla 6.

Determinación de los parámetros del resalto hidráulico.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal del canal	Q	13,00	m ³ /s
Ancho del canal	b	2,00	m
Pendiente del canal	S2	0,10	%
Velocidad crítica	vc	3,99	m/s
Calado crítico	yc	1,63	m
Pendiente crítica	Sc	0,50	%
Energía específica	Eo	4,41	m
Caudal unitario	q	6,50	m ³ /s*m
Coefficiente de velocidad	φ	1	
Profundidad contraída	y1	0,77	m
Segunda conjugada	y2	2,98	m
Número de Froude	F1	1,45	

Nota: En la tabla se describe los datos y parámetros del resalto con valores, símbolos y números. Elaborado por: Los autores.

De la tabla 6, se determinó los parámetros del resalto como la primera y segunda conjugada son 0.77 y 2.98 m respectivamente, y con ello se resuelve que el valor del número de Froude (F1) se encuentra, entre 1 y 1.7, en este rango la superficie de agua muestra ondulaciones y se presenta un resalto ondulante.

También se puede observar que el calado crítico (yc) presenta una velocidad crítica de 3.99 m/s, mientras que la velocidad en el calado conjugado mayor es 2.18 m/s.

4.3.1. Perfil de la superficie libre del flujo en el canal de conducción.

Para encontrar el perfil de flujo del canal con flujo gradualmente variado se parte de la profundidad contraída (y1) como punto de control hacia aguas abajo en donde se encuentra con el inicio de la rápida a 41.8 m de longitud. El método utilizado para determinar el perfil de flujo es el método de Charnosky.

Tabla 7.

Cálculos para la construcción de la curva de superficie libre por el método de Charnosky

hi (m)	w (m2)	E (m)	ΔE (m)	\bar{h} (m)	\bar{w} (m2)	\bar{x} (m)	\bar{R} (m)	\bar{C}	if	ΔS (m)	ΔS acum (m)	y2 (m)
0,769	1,538	4,410	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,774	1,548	4,368	-0,042	0,772	1,543	3,543	0,436	62,188	0,042	1,018	1,018	2,977
0,779	1,558	4,327	-0,041	0,777	1,553	3,553	0,437	62,226	0,041	1,015	2,033	2,964
0,784	1,568	4,287	-0,040	0,782	1,563	3,563	0,439	62,263	0,041	1,011	3,044	2,952
0,789	1,578	4,248	-0,039	0,787	1,573	3,573	0,440	62,300	0,040	1,007	4,051	2,939
0,794	1,588	4,209	-0,038	0,792	1,583	3,583	0,442	62,337	0,039	1,004	5,055	2,926
0,799	1,598	4,172	-0,038	0,797	1,593	3,593	0,443	62,374	0,039	1,000	6,055	2,914
0,804	1,608	4,135	-0,037	0,802	1,603	3,603	0,445	62,410	0,038	0,996	7,052	2,901
0,809	1,618	4,099	-0,036	0,807	1,613	3,613	0,446	62,446	0,037	0,993	8,044	2,889
0,814	1,628	4,064	-0,035	0,812	1,623	3,623	0,448	62,481	0,037	0,989	9,033	2,877
0,819	1,638	4,029	-0,035	0,817	1,633	3,633	0,450	62,517	0,036	0,985	10,019	2,865
0,824	1,648	3,995	-0,034	0,822	1,643	3,643	0,451	62,551	0,035	0,982	11,000	2,853
0,829	1,658	3,962	-0,033	0,827	1,653	3,653	0,453	62,586	0,035	0,978	11,978	2,841
0,834	1,668	3,930	-0,032	0,832	1,663	3,663	0,454	62,621	0,034	0,974	12,952	2,829

hi (m)	w (m2)	E (m)	ΔE (m)	\bar{h} (m)	\bar{w} (m2)	\bar{x} (m)	\bar{R} (m)	\bar{C}	if	ΔS (m)	ΔS acum (m)	y2 (m)
0,839	1,678	3,898	-0,032	0,837	1,673	3,673	0,456	62,655	0,034	0,970	13,922	2,817
0,844	1,688	3,867	-0,031	0,842	1,683	3,683	0,457	62,689	0,033	0,966	14,888	2,806
0,849	1,698	3,836	-0,030	0,847	1,693	3,693	0,458	62,722	0,033	0,962	15,851	2,794
0,854	1,708	3,806	-0,030	0,852	1,703	3,703	0,460	62,755	0,032	0,958	16,809	2,783
0,859	1,718	3,777	-0,029	0,857	1,713	3,713	0,461	62,788	0,032	0,955	17,764	2,771
0,864	1,728	3,748	-0,029	0,862	1,723	3,723	0,463	62,821	0,031	0,951	18,714	2,760
0,869	1,738	3,720	-0,028	0,867	1,733	3,733	0,464	62,854	0,031	0,947	19,661	2,749
0,874	1,748	3,693	-0,028	0,872	1,743	3,743	0,466	62,886	0,030	0,943	20,604	2,738
0,879	1,758	3,666	-0,027	0,877	1,753	3,753	0,467	62,918	0,030	0,939	21,542	2,727
0,884	1,768	3,639	-0,026	0,882	1,763	3,763	0,469	62,950	0,029	0,935	22,477	2,716
0,889	1,778	3,613	-0,026	0,887	1,773	3,773	0,470	62,981	0,029	0,931	23,407	2,705
0,894	1,788	3,588	-0,025	0,892	1,783	3,783	0,471	63,013	0,028	0,926	24,334	2,694
0,899	1,798	3,563	-0,025	0,897	1,793	3,793	0,473	63,044	0,028	0,922	25,256	2,683
0,904	1,808	3,539	-0,024	0,902	1,803	3,803	0,474	63,074	0,028	0,918	26,175	2,673
0,909	1,818	3,515	-0,024	0,907	1,813	3,813	0,475	63,105	0,027	0,914	27,089	2,662
0,914	1,828	3,491	-0,023	0,912	1,823	3,823	0,477	63,135	0,027	0,910	27,999	2,652
0,919	1,838	3,468	-0,023	0,917	1,833	3,833	0,478	63,165	0,026	0,906	28,904	2,641
0,924	1,848	3,446	-0,023	0,922	1,843	3,843	0,480	63,195	0,026	0,902	29,806	2,631
0,929	1,858	3,424	-0,022	0,927	1,853	3,853	0,481	63,225	0,026	0,897	30,703	2,620
0,934	1,868	3,402	-0,022	0,932	1,863	3,863	0,482	63,254	0,025	0,893	31,596	2,610
0,939	1,878	3,381	-0,021	0,937	1,873	3,873	0,484	63,283	0,025	0,889	32,485	2,600
0,944	1,888	3,360	-0,021	0,942	1,883	3,883	0,485	63,312	0,025	0,884	33,369	2,590
0,949	1,898	3,340	-0,020	0,947	1,893	3,893	0,486	63,341	0,024	0,880	34,249	2,580
0,954	1,908	3,320	-0,020	0,952	1,903	3,903	0,488	63,370	0,024	0,876	35,125	2,570
0,959	1,918	3,300	-0,020	0,957	1,913	3,913	0,489	63,398	0,023	0,871	35,996	2,560
0,964	1,928	3,281	-0,019	0,962	1,923	3,923	0,490	63,426	0,023	0,867	36,863	2,550
0,969	1,938	3,262	-0,019	0,967	1,933	3,933	0,491	63,454	0,023	0,863	37,726	2,541
0,974	1,948	3,244	-0,018	0,972	1,943	3,943	0,493	63,482	0,023	0,858	38,584	2,531
0,979	1,958	3,226	-0,018	0,977	1,953	3,953	0,494	63,509	0,022	0,854	39,438	2,521
0,984	1,968	3,208	-0,018	0,982	1,963	3,963	0,495	63,537	0,022	0,849	40,287	2,512
0,989	1,978	3,190	-0,017	0,987	1,973	3,973	0,497	63,564	0,022	0,845	41,131	2,502
0,994	1,988	3,173	-0,017	0,992	1,983	3,983	0,498	63,591	0,021	0,840	41,971	2,493

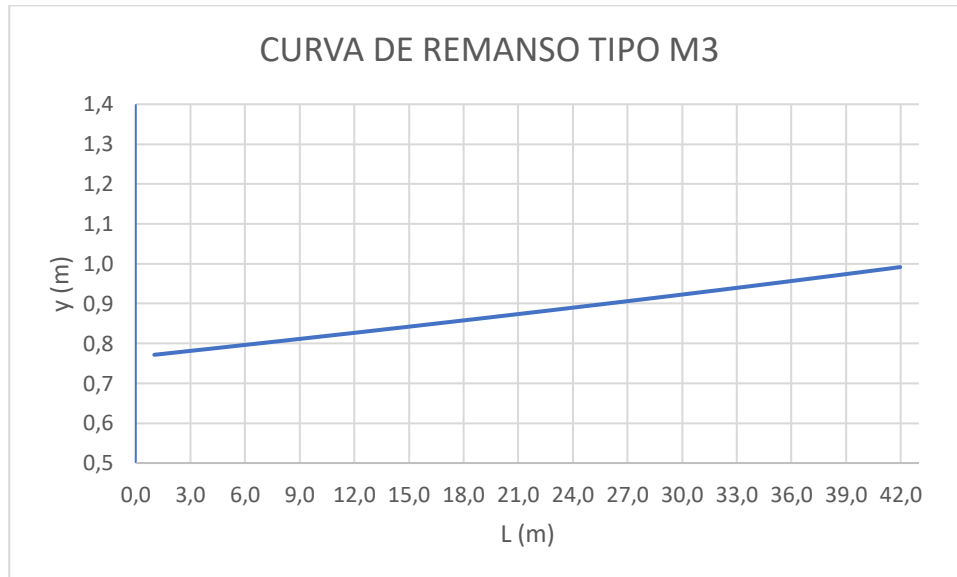
Nota: En la tabla se describe los parámetros con valores, símbolos y números. Elaborado por: Los autores.

En la tabla 7, se puede observar que el calado (y_2) al final de los 41.8 m del canal de conducción es 2.49, por lo tanto, el resalto se rechaza hasta el inicio de la rápida donde se forma el calado crítico (y_c), formando la curva de remanso tipo M3. La velocidad media de flujo al final del canal es de 6.55 m/s.

A continuación, se traza el perfil de flujo gradualmente variado del canal correspondiente a 41.8 metros de longitud. Debido a que la pendiente crítica es mayor a la pendiente geométrica, se considera un canal con una pendiente moderada y por ende una curva de remanso tipo M3.

Figura 39.

Curva de remanso para el flujo gradualmente variado del canal de excesos.



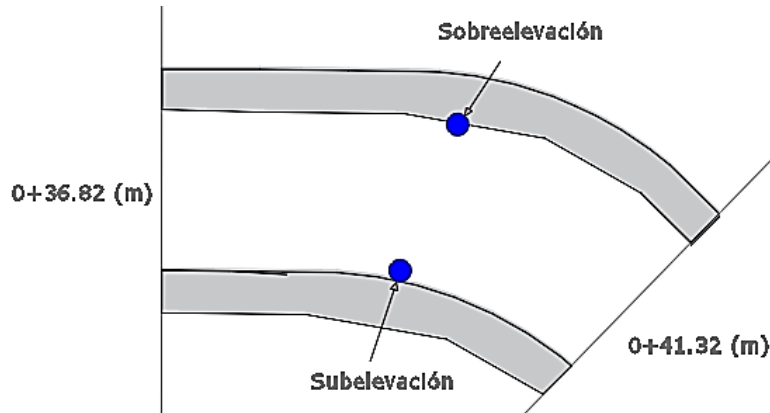
Nota. Se observa que la curva es tipo M y está en la zona 3. Elaborado por: Los autores.

Se debe acotar, que aproximadamente a los 3 metros del canal de conducción hay una curva que genera una sobreelevación en el flujo de 0.44 m, dando un valor de profundidad en la curva

externa de 1.22 m y en la curva interna es 0.342. La velocidad respectiva en el punto medio de la curva es 8.31m/s y la sobre elevación se calculó con la Ec. 29.

Figura 40.

Esquema de sobreelevación en la curva del canal.



Nota. Se observa que la sobre elevación está en la parte exterior de la curva, en cambio la subelevación en la parte interna. Elaborado por: Los autores.

4.4. Flujo gradualmente variado en la rápida de excesos

Existen 2 condiciones para el cálculo del perfil de flujo, en el primero, la rápida circular lisa trabaja con un flujo gradualmente variado para después presentarse un flujo supercrítico uniforme, esto sin considerar la introducción de aire.

El segundo, considerando la introducción de aire, se forma el flujo gradualmente variado hasta el punto de inepción, luego se forma un flujo gradualmente variado auto aireado, en el cual se presenta el aumento de volumen del flujo debido a las partículas de aire que se forman sobre la superficie del mismo.

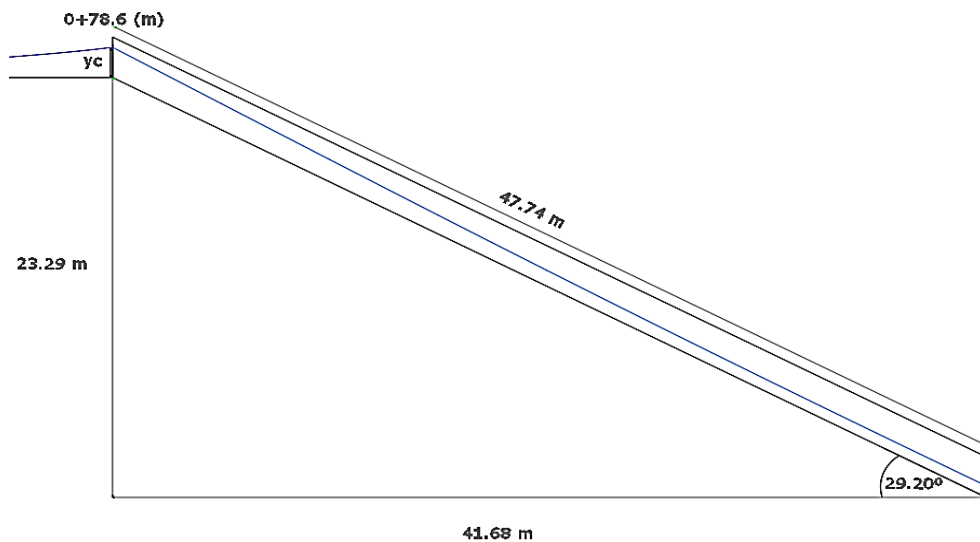
Para el desarrollo de la rápida lisa se calcula el calado crítico (y_c) al inicio de la misma, se asume que se genera este calado a pesar de que los resultados indican que el resalto es rechazado,

debido a que una parte del flujo de agua va a chocar de frente contra la pared del anclaje que se encuentra al inicio de la rápida y otra parte ingresa dentro de la rápida de excesos.

El calado crítico (y_c) de la elipse que se forma en el lado oblicuo de la tubería se estimó a partir de la profundidad crítica de la sección circular, y su valor es 1.772 m. Se procedió a encontrar las características generales de la rápida lisa circular.

Figura 41.

Corte longitudinal de la rápida circular lisa.



Nota. Se observa los parámetros de la rápida circular lisa. Elaborado por: Los autores.

Los parámetros generales para el análisis de la rápida circular lisa son los siguientes:

Tabla 8.*Determinación de los parámetros de la rápida lisa*

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal de diseño	Qdis	13,00	m/s
Diámetro de la tubería	do	2,20	m
Radio de la tubería	ro	1,10	m
Coefficiente de Manning	n	0,01	-
Altura del desnivel	Hr	23,29	m
Distancia Horizontal de la rápida	Lh	41,68	m
Ángulo de inclinación de la rápida	α	29,19	°
Calado critico a la entrada	yc	1,77	m
Pendiente de la rápida	So	55,88	%
Velocidad critica	vc	4,10	m/s
Sección de flujo a la entrada	W	3,17	m ²
Perímetro mojado	P	4,75	m
Radio hidráulico	R	0,30	m
Número de Froude	F	0,88	-
Variación de altura en el calado	Δh	0,0200	m
Longitud de la rápida	Lr	47,74	m

Nota: En la tabla se describe los parámetros de la rápida lisa con valores, símbolos y números.

Elaborado por: Los autores.

4.4.1. Perfil de flujo de la rápida circular lisa sin introducción de aire.

Tabla 9.

Cálculos para la determinación del perfil de flujo de la rápida lisa circular sin introducción de aire

Tramo	h1 (m)	h2 (m)	W1 (m2)	W2 (m2)	\bar{h} (m)	θ (rad)	\bar{w} (m2)	\bar{R} (m)	\bar{C} -	E1 (m)	E2 (m)	S Fr -	ΔS (m)	ΔSacum (m)	V (m/s)
1	1.77	1.75	3.28	3.25	1.76	4.43	3.26	0.30	82.01	0.80	0.82	0.01	0.03	0.03	3.98
2	1.75	1.73	3.25	3.21	1.74	4.39	3.23	0.67	93.52	0.82	0.84	0.00	0.03	0.06	4.03
3	1.73	1.71	3.21	3.17	1.72	4.34	3.19	0.67	93.50	0.84	0.85	0.00	0.03	0.10	4.07
4	1.71	1.69	3.17	3.14	1.70	4.30	3.16	0.67	93.48	0.85	0.88	0.00	0.04	0.14	4.12
5	1.69	1.67	3.14	3.10	1.68	4.26	3.12	0.67	93.45	0.88	0.90	0.00	0.04	0.17	4.17
6	1.67	1.65	3.10	3.06	1.66	4.21	3.08	0.66	93.42	0.90	0.92	0.00	0.04	0.21	4.22
7	1.65	1.63	3.06	3.02	1.64	4.17	3.04	0.66	93.38	0.92	0.94	0.00	0.04	0.26	4.27
8	1.63	1.61	3.02	2.99	1.62	4.13	3.00	0.66	93.34	0.94	0.97	0.00	0.04	0.30	4.33
9	1.61	1.59	2.99	2.95	1.60	4.09	2.97	0.66	93.29	0.97	0.99	0.00	0.05	0.35	4.38
10	1.59	1.57	2.95	2.91	1.58	4.05	2.93	0.66	93.24	0.99	1.02	0.00	0.05	0.40	4.44
11	1.57	1.55	2.91	2.87	1.56	4.01	2.89	0.65	93.18	1.02	1.05	0.00	0.05	0.45	4.50
12	1.55	1.53	2.87	2.83	1.54	3.97	2.85	0.65	93.12	1.05	1.08	0.00	0.05	0.50	4.57
13	1.53	1.51	2.83	2.79	1.52	3.93	2.81	0.65	93.05	1.08	1.11	0.00	0.06	0.56	4.63
14	1.51	1.49	2.79	2.74	1.50	3.89	2.77	0.65	92.98	1.11	1.14	0.00	0.06	0.62	4.70
15	1.49	1.47	2.74	2.70	1.48	3.85	2.72	0.64	92.91	1.14	1.18	0.00	0.06	0.68	4.77
16	1.47	1.45	2.70	2.66	1.46	3.81	2.68	0.64	92.82	1.18	1.22	0.00	0.07	0.75	4.85
17	1.45	1.43	2.66	2.62	1.44	3.77	2.64	0.64	92.74	1.22	1.25	0.00	0.07	0.82	4.92
18	1.43	1.41	2.62	2.58	1.42	3.74	2.60	0.63	92.65	1.25	1.30	0.00	0.07	0.89	5.00
19	1.41	1.39	2.58	2.54	1.40	3.70	2.56	0.63	92.55	1.30	1.34	0.00	0.08	0.97	5.08
20	1.39	1.37	2.54	2.49	1.38	3.66	2.51	0.62	92.45	1.34	1.39	0.01	0.08	1.06	5.17
21	1.37	1.35	2.49	2.45	1.36	3.62	2.47	0.62	92.35	1.39	1.43	0.01	0.09	1.14	5.26

Tramo	h1 (m)	h2 (m)	W1 (m2)	W2 (m2)	\bar{h} (m)	θ (rad)	\bar{w} (m2)	\bar{R} (m)	\bar{C} -	E1 (m)	E2 (m)	S Fr -	ΔS (m)	ΔS_{acum} (m)	V (m/s)
22	1.35	1.33	2.45	2.41	1.34	3.59	2.43	0.62	92.24	1.43	1.49	0.01	0.09	1.24	5.35
23	1.33	1.31	2.41	2.36	1.32	3.55	2.39	0.61	92.13	1.49	1.54	0.01	0.10	1.34	5.45
24	1.31	1.29	2.36	2.32	1.30	3.51	2.34	0.61	92.01	1.54	1.60	0.01	0.10	1.44	5.55
25	1.29	1.27	2.32	2.28	1.28	3.47	2.30	0.60	91.88	1.60	1.66	0.01	0.11	1.55	5.65
26	1.27	1.25	2.28	2.23	1.26	3.44	2.26	0.60	91.75	1.66	1.73	0.01	0.12	1.67	5.76
27	1.25	1.23	2.23	2.19	1.24	3.40	2.21	0.59	91.62	1.73	1.79	0.01	0.13	1.80	5.88
28	1.23	1.21	2.19	2.15	1.22	3.36	2.17	0.59	91.48	1.79	1.87	0.01	0.13	1.93	5.99
29	1.21	1.19	2.15	2.10	1.20	3.33	2.13	0.58	91.34	1.87	1.95	0.01	0.14	2.07	6.12
30	1.19	1.17	2.10	2.06	1.18	3.29	2.08	0.57	91.19	1.95	2.03	0.01	0.15	2.22	6.25
31	1.17	1.15	2.06	2.02	1.16	3.25	2.04	0.57	91.03	2.03	2.12	0.01	0.16	2.39	6.38
32	1.15	1.13	2.02	1.97	1.14	3.22	1.99	0.56	90.87	2.12	2.22	0.01	0.17	2.56	6.52
33	1.13	1.11	1.97	1.93	1.12	3.18	1.95	0.56	90.71	2.22	2.32	0.01	0.19	2.75	6.67
34	1.11	1.09	1.93	1.88	1.10	3.15	1.91	0.55	90.54	2.32	2.43	0.01	0.20	2.95	6.82
35	1.09	1.07	1.88	1.84	1.08	3.11	1.86	0.54	90.36	2.43	2.55	0.01	0.21	3.16	6.98
36	1.07	1.05	1.84	1.80	1.06	3.07	1.82	0.54	90.18	2.55	2.67	0.01	0.23	3.39	7.15
37	1.05	1.03	1.80	1.75	1.04	3.04	1.77	0.53	89.99	2.67	2.81	0.01	0.25	3.64	7.33
38	1.03	1.01	1.75	1.71	1.02	3.00	1.73	0.52	89.79	2.81	2.95	0.01	0.27	3.91	7.52
39	1.01	0.99	1.71	1.66	1.00	2.96	1.69	0.52	89.59	2.95	3.11	0.01	0.29	4.20	7.71
40	0.99	0.97	1.66	1.62	0.98	2.93	1.64	0.51	89.38	3.11	3.28	0.02	0.31	4.51	7.92
41	0.97	0.95	1.62	1.58	0.96	2.89	1.60	0.50	89.17	3.28	3.47	0.02	0.34	4.85	8.13
42	0.95	0.93	1.58	1.53	0.94	2.85	1.55	0.50	88.95	3.47	3.67	0.02	0.37	5.22	8.36
43	0.93	0.91	1.53	1.49	0.92	2.82	1.51	0.49	88.72	3.67	3.88	0.02	0.40	5.62	8.60
44	0.91	0.89	1.49	1.45	0.90	2.78	1.47	0.48	88.49	3.88	4.12	0.02	0.44	6.06	8.86
45	0.89	0.87	1.45	1.40	0.88	2.74	1.42	0.47	88.24	4.12	4.38	0.02	0.48	6.54	9.13
46	0.87	0.85	1.40	1.36	0.86	2.71	1.38	0.46	87.99	4.38	4.66	0.02	0.53	7.07	9.41
47	0.85	0.83	1.36	1.32	0.84	2.67	1.34	0.46	87.73	4.66	4.96	0.03	0.58	7.64	9.71
48	0.83	0.81	1.32	1.27	0.82	2.63	1.30	0.45	87.47	4.96	5.30	0.03	0.64	8.28	10.0

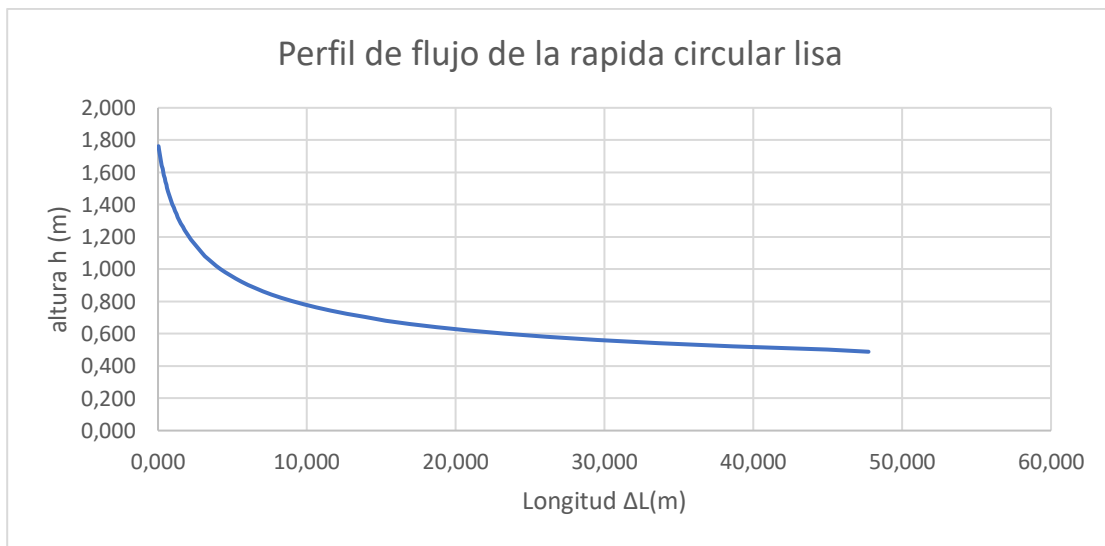
Tramo	h1 (m)	h2 (m)	W1 (m2)	W2 (m2)	\bar{h} (m)	θ (rad)	\bar{w} (m2)	\bar{R} (m)	\bar{C} -	E1 (m)	E2 (m)	S Fr -	ΔS (m)	ΔS_{acum} (m)	V (m/s)
49	0.81	0.79	1.27	1.23	0.80	2.59	1.25	0.44	87.19	5.30	5.67	0.03	0.70	8.99	10.3
50	0.79	0.77	1.23	1.19	0.78	2.56	1.21	0.43	86.91	5.67	6.08	0.04	0.78	9.77	10.7
51	0.77	0.75	1.19	1.15	0.76	2.52	1.17	0.42	86.62	6.08	6.53	0.04	0.87	10.63	11.1
52	0.75	0.73	1.15	1.11	0.74	2.48	1.13	0.41	86.31	6.53	7.03	0.04	0.97	11.60	11.5
53	0.73	0.71	1.11	1.07	0.72	2.44	1.09	0.40	86.00	7.03	7.59	0.05	1.09	12.69	11.9
54	0.71	0.69	1.07	1.02	0.70	2.40	1.04	0.40	85.68	7.59	8.21	0.05	1.23	13.92	12.4
55	0.69	0.67	1.02	0.98	0.68	2.36	1.00	0.39	85.34	8.21	8.90	0.06	1.39	15.31	12.9
56	0.67	0.65	0.98	0.94	0.66	2.32	0.96	0.38	85.00	8.90	9.68	0.07	1.58	16.89	13.4
57	0.65	0.63	0.94	0.90	0.64	2.28	0.92	0.37	84.64	9.68	10.55	0.08	1.81	18.70	14.0
58	0.63	0.61	0.90	0.86	0.62	2.24	0.88	0.36	84.27	10.55	11.55	0.09	2.09	20.79	14.7
59	0.61	0.59	0.86	0.82	0.60	2.20	0.84	0.35	83.89	11.55	12.67	0.10	2.43	23.23	15.4
60	0.59	0.57	0.82	0.79	0.58	2.16	0.81	0.34	83.49	12.67	13.95	0.11	2.86	26.09	16.1
61	0.57	0.55	0.79	0.75	0.56	2.12	0.77	0.33	83.07	13.95	15.42	0.13	3.40	29.49	16.9
62	0.55	0.53	0.75	0.71	0.54	2.08	0.73	0.32	82.64	15.42	17.12	0.15	4.11	33.60	17.8
63	0.53	0.51	0.71	0.67	0.52	2.04	0.69	0.31	82.20	17.12	19.08	0.17	5.04	38.64	18.8
64	0.51	0.49	0.67	0.64	0.50	1.99	0.65	0.30	81.73	19.08	21.36	0.20	6.34	44.98	19.9
65	0.49	0.48	0.64	0.62	0.49	1.96	0.63	0.29	81.41	21.36	22.29	0.22	2.75	47.74	20.6

Nota: En la tabla se describe los parámetros para calcular el perfil de flujo de la rápida lisa sin introducción de aire, por el método de Charnosky. Elaborado por: Los autores.

De la tabla 9, se puede observar que la velocidad al inicio de la rápida correspondiente al calado crítico (y_c) es 3.98m/s, mientras que el calado a salida de la rápida es 0.49 m, y le corresponde una velocidad de flujo de 20.6 m/s, por ello se concluye que existe un aumento drástico en la velocidad del flujo.

Figura 42.

Perfil de flujo de la rápida lisa.



Nota. Se observa una curva tipo S en la zona 2. Elaborado por: Los autores.

El perfil de flujo se calculó de acuerdo con el método de Charnosky, usando las ecuaciones mencionadas anteriormente. No se consideró la introducción de aire y el resultado fue una curva de caída TIPO S2.

En la figura 42. Se presenta la curva de caída TIPO S2, en la cual se visualiza el perfil de flujo a lo largo de la rápida.

De los cálculos también se puede ver que la variación de energía del tramo inicial con respecto al tramo final es considerable, variando de 0.80 m a 22.29 m respectivamente.

4.4.2. Flujo con introducción de aire.

Para el flujo con introducción de aire se consideran los resultados del perfil de flujo sin introducción de aire hasta llegar al punto de inyección, a partir de este punto se realiza otras consideraciones pertinentes para el perfil mencionado.

4.4.2.1. *Introducción de aire en la capa límite.*

El perfil de flujo presentado anteriormente es para condiciones ideales, pese a que no es real se utiliza para la construcción del perfil de flujo con introducción de aire, en este caso debido a la alta velocidad del flujo ocurre una incorporación de burbujas de aire dentro de la superficie de agua y por consiguiente aumenta el volumen del fluido y disminuye la velocidad. Debido a lo mencionado se procede a determinar los datos para el cálculo del perfil de flujo con introducción de aire.

Tabla 10.

Datos para el cálculo del perfil de flujo con aireación.

Descripción	Símbolo	Unidad	Valor
Número de Reynolds	Re	-	9020000,00
Coefficiente en función de la pendiente	J	-	0,488
Caudal unitario	q	(m ³ /s)*m	5,91

Nota: En la tabla se describe los datos con valores, símbolos y unidades. Elaborado por: Los autores.

El flujo con introducción de aire representa un fenómeno más real, debido a que existe una región, en la cual el flujo se interseca con la capa límite turbulenta, en ella se encuentra el punto de inyección. Por medio de la tabla 4-11 se localiza el punto de inyección y se determina los parámetros hidráulicos con introducción de aire.

Tabla 11.*Parámetros hidráulicos para el perfil de flujo con aireación.*

Tramo	ΔS acum	y	δ	c	d	W	V
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m/s)
1	0.03	1.75	0.00	-	1.75	3.25	4.00
2	0.06	1.73	0.00	-	1.73	3.21	4.05
3	0.10	1.71	0.00	-	1.71	3.17	4.10
4	0.14	1.69	0.00	-	1.69	3.14	4.14
5	0.17	1.67	0.00	-	1.67	3.10	4.19
6	0.21	1.65	0.00	-	1.65	3.06	4.25
7	0.26	1.63	0.00	-	1.63	3.02	4.30
8	0.30	1.61	0.00	-	1.61	2.99	4.35
9	0.35	1.59	0.01	-	1.59	2.95	4.41
10	0.40	1.57	0.01	-	1.57	2.91	4.47
11	0.45	1.55	0.01	-	1.55	2.87	4.53
12	0.50	1.53	0.01	-	1.53	2.83	4.60
13	0.56	1.51	0.01	-	1.51	2.79	4.67
14	0.62	1.49	0.01	-	1.49	2.74	4.74
15	0.68	1.47	0.01	-	1.47	2.70	4.81
16	0.75	1.45	0.01	-	1.45	2.66	4.88
17	0.82	1.43	0.01	-	1.43	2.62	4.96
18	0.89	1.41	0.01	-	1.41	2.58	5.04
19	0.97	1.39	0.02	-	1.39	2.54	5.13
20	1.06	1.37	0.02	-	1.37	2.49	5.21
21	1.14	1.35	0.02	-	1.35	2.45	5.30
22	1.24	1.33	0.02	-	1.33	2.41	5.40
23	1.34	1.31	0.02	-	1.31	2.36	5.50
24	1.44	1.29	0.02	-	1.29	2.32	5.60
25	1.55	1.27	0.02	-	1.27	2.28	5.71
26	1.67	1.25	0.03	-	1.25	2.23	5.82
27	1.80	1.23	0.03	-	1.23	2.19	5.93
28	1.93	1.21	0.03	-	1.21	2.15	6.05
29	2.07	1.19	0.03	-	1.19	2.10	6.18
30	2.22	1.17	0.03	-	1.17	2.06	6.31
31	2.39	1.15	0.04	-	1.15	2.02	6.45
32	2.56	1.13	0.04	-	1.13	1.97	6.59
33	2.75	1.11	0.04	-	1.11	1.93	6.74
34	2.95	1.09	0.05	-	1.09	1.88	6.90
35	3.16	1.07	0.05	-	1.07	1.84	7.07
36	3.39	1.05	0.05	-	1.05	1.80	7.24
37	3.64	1.03	0.06	-	1.03	1.75	7.42
38	3.91	1.01	0.06	-	1.01	1.71	7.61

Tramo	ΔS acum	γ	δ	c	d	W	V
39	4.20	0.99	0.06	-	0.99	1.66	7.81
40	4.51	0.97	0.07	-	0.97	1.62	8.02
41	4.85	0.95	0.07	-	0.95	1.58	8.25
42	5.22	0.93	0.08	-	0.93	1.53	8.48
43	5.62	0.91	0.09	-	0.91	1.49	8.73
44	6.06	0.89	0.09	-	0.89	1.45	8.99
45	6.54	0.87	0.10	-	0.87	1.40	9.27
46	7.07	0.85	0.11	-	0.85	1.36	9.56
47	7.64	0.83	0.12	-	0.83	1.32	9.87
48	8.28	0.81	0.13	-	0.81	1.27	10.20
49	8.99	0.79	0.14	-	0.79	1.23	10.55
50	9.77	0.77	0.15	-	0.77	1.19	10.92
51	10.63	0.75	0.16	-	0.75	1.15	11.32
52	11.60	0.73	0.18	-	0.73	1.11	11.75
53	12.69	0.71	0.20	-	0.71	1.07	12.20
54	13.92	0.69	0.21	-	0.69	1.02	12.69
55	15.31	0.67	0.24	-	0.67	0.98	13.21
56	16.89	0.65	0.26	-	0.65	0.94	13.78
57	18.70	0.63	0.29	-	0.63	0.90	14.39
58	20.79	0.61	0.32	-	0.61	0.86	15.05
59	23.23	0.59	0.36	-	0.59	0.82	15.77
60	26.09	0.57	0.40	-	0.57	0.79	16.55
61	29.49	0.55	0.46	-	0.55	0.75	17.40
62	33.60	0.53	0.52	0.08	0.58	0.80	16.18
63	38.64	0.51	0.60	0.10	0.57	0.78	16.75
64	44.98	0.49	0.69	0.11	0.55	0.75	17.27
65	47.74	0.48	0.74	0.12	0.55	0.75	17.45

Nota: En la tabla se describe los parámetros hidráulicos con valores, símbolos y unidades.

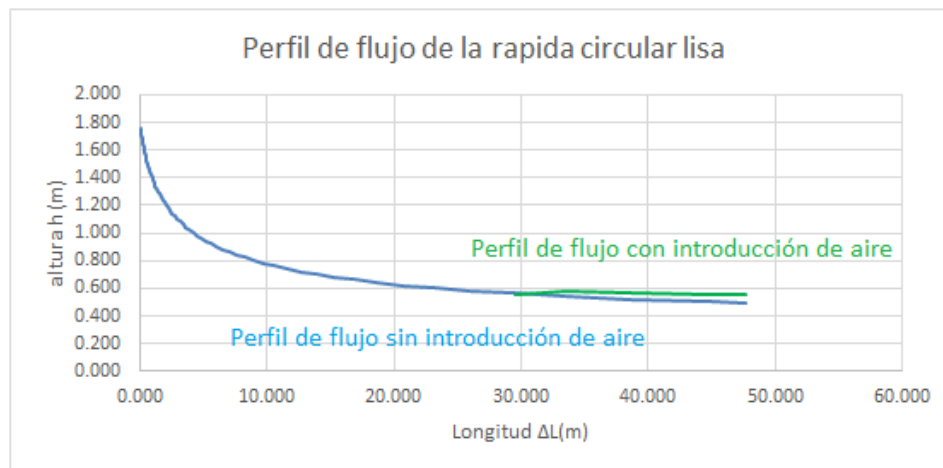
Elaborado por: Los autores.

De la tabla 11, se determina que el punto de inyección se encuentra en el tramo 62 y desde ese punto comienza el incremento de volumen del flujo por el inicio de introducción de aire hacia aguas abajo.

En la misma tabla, se presenta una profundidad de flujo con introducción de aire final de 0,75 metros, a la cual le corresponde una velocidad de 17.45 metros por segundo a la salida de la rápida circular lisa.

Figura 43.

Perfiles de flujo con introducción y sin introducción de aire.



Nota. Se observa la introducción de aire al final de la curva. Elaborado por: Los autores.

Se puede definir que la velocidad de flujo bifásico a la salida de la rápida con introducción de aire es menor a la velocidad en el cálculo sin introducción de aire, siendo estas 17.45 y 20.69 m/s respectivamente. Además, se concluye que la velocidad a la salida es superior a la velocidad admisible para tuberías de acero, la cual es 10 m/s.

En la figura 43, a partir del punto de inyección a los 34,00 m de longitud aproximadamente, se visualiza con claridad el aumento del calado de una curva con introducción de aire con respecto a la otra.

A medida que comienza a presentarse la turbulencia desde el punto de inyección, la velocidad disminuye y el calado aumenta. El calado a la salida de la rápida sin aireación es 0,489m, mientras que sin aireación es 0,75 m.

Una vez realizada la evaluación de las obras existentes, podemos apreciar que la velocidad de flujo a la salida de la rápida circular lisa excede a la velocidad máxima permisible, por esta razón ocurre el deterioro interno de la tubería de acero y se presume la socavación en el fondo del cauce.

CAPÍTULO V

DISEÑO DE LA RÁPIDA ESCALONADA.

Debido a lo mencionado anteriormente se diseñó como alternativa una rápida escalonada considerando el flujo auto aireado en el mismo, de la misma forma, se procede a encontrar el punto de inyección dentro de un flujo rasante (skimming flow), y se calculara de acuerdo a la base teórica presentada en el capítulo 3.

5.1. Prediseño geométrico de la rápida escalonada. –

Según las condiciones geométricas, el prediseño se encuentra limitado por la pendiente del terreno y por las demás obras preexistentes, como son el canal de conducción y la obra de disipación en el cauce, las mismas que limitan el desarrollo geométrico de la rápida escalonada,

Debido a las características geométricas de la rápida, cuyo ángulo de inclinación es 29.20° , se decide que es recomendable realizar los cálculos con flujo rasante, porque el ángulo de la rápida es mayor a 22° , eso implica el aumento de la velocidad de flujo y por lo tanto necesita mayor disipación de energía, esta disipación se consigue con el diseño skimming flow (flujo rasante).

A continuación, se presentan los datos necesarios para el cálculo del diseño del flujo rasante.

Tabla 12.*Datos para el prediseño del perfil escalonado con flujo rasante.*

DATOS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Caudal	Qdis	m ³ /s	13
Caudal unitario	q	m ³ /s/m	5,91
Altura de Rápida	Hr	m	23,29
Coefficiente de talud	m2		1,79
Ancho del canal	b	m	2,2
Carga de agua (carga de presión)	Ho	m	1,01
Aceleración de la gravedad	g	m/s ²	9,81

Nota: En la tabla se describe los datos, con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores.

Una vez planteado los datos se procede al diseño del perfil escalonado con flujo rasante.

Se presenta los resultados de los parámetros del prediseño del perfil escalonado.

Tabla 13.*Prediseño del perfil escalonado.*

DESCRIPCION	SÍMBOL	UNIDA	VALO
Profundidad crítica	yc	m	1,53
Angulo inclinación del talud	α	°	29,20
Profundidad normal	h	m	0,24
yc/h	yc/h	-	1,018
Contrahuella calculada	hcal	m	0,46
Contrahuella (adoptado)	hc	m	0,500
Longitud huella calculada	lcal	m	0,82
Longitud huella (adoptado)	l	m	0,90
Pendiente del perfil escalonado	hc/l	-	0,56
Numero de contrahuellas	#c	-	47
Numero de huellas	#h	-	46
Longitud inclinada del perfil escalonado	Lr	m	46,97
Comprobación de perfil escalonado	Hr/yc>10	15,25	Cumple

Nota: En la tabla se describe los parámetros de diseño, con valores, unidades y símbolos.

Elaborado por: Los autores.

Como resultado de la tabla 13 se tiene 46 huellas y 47 contrahuellas, correspondientes a 47 escalones de 50 cm de altura y 90 cm de huella.

5.1.1. Flujo rasante, con introducción de aire. –

La introducción de aire en la rápida escalonada ocurre por dos fenómenos: (1) flujo entre escalones y (2) en el interior del flujo rasante, sin embargo, la forma en la que se presenta el aire dentro del flujo es diferente en ambos casos. En el primero, la introducción de aire se forma en el área de colisión del flujo con el escalón, y en el segundo caso ocurre cuando la capa que tiene turbulencia asciende sobre la superficie de flujo.

Con lo mencionado anteriormente se localizó la longitud hasta el punto de inyección y su correspondiente calado.

Tabla 14.

Parámetros del punto de inyección.

DESCRIPCION	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Froude de rugosidad	F*		8,75
Longitud hasta el punto inyección	Li	m	18,82
Calado en el punto de inyección	yi	m	0,68

Nota: Se describe la longitud hasta el punto de inyección y el calado en el mismo. Elaborado por: Los autores.

En resumen, se tiene que la longitud al punto de inyección es de 18.82 metros, es decir desde esta longitud la capa de turbulencia alcanza la superficie de flujo. Y su calado hasta el punto de inyección corresponde a 0.68 metros.

Disipación de energía del perfil escalonado. –

Realizado el prediseño geométrico del perfil escalonado y localizado el punto de inyección de aire, se procedió a calcular los parámetros de disipación de energía.

Tabla 15.

Disipación de energía del perfil escalonado.

DESCRIPCION	SÍMBOL	UNIDA	VALOR
Concentración media de aire	\hat{C}	%	42,18
Factor de fricción para flujo aireado	f_e		0,1
Ley de distribución de velocidades	N		3,5
	α		1,14
Energía al inicio de la rápida	E1	m	25,58
Energía disipada	ΔE	m	16,08
Energía total a la salida de la rápida	E2	m	9.50
Porcentaje de disipación	% ΔE	%	62.86
Profundidad normal	y_1	m	0,57
Velocidad máxima al pie de la rápida	V_{max}	m/s	22,22
Relación E1/ y_c	E1/ y_c		16,75
Relación U_w / V_{max}	U_w		0,4688
Velocidad real al pie de la rápida escalonada	V	m/s	10,42

Nota: En la tabla se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos Elaborado por: Los autores.

Con la relación de la energía E1/ y_c y la relación U_w / V_{max} al final de la rápida, se calcula que la velocidad al final de la rápida es 10,4 m/s.

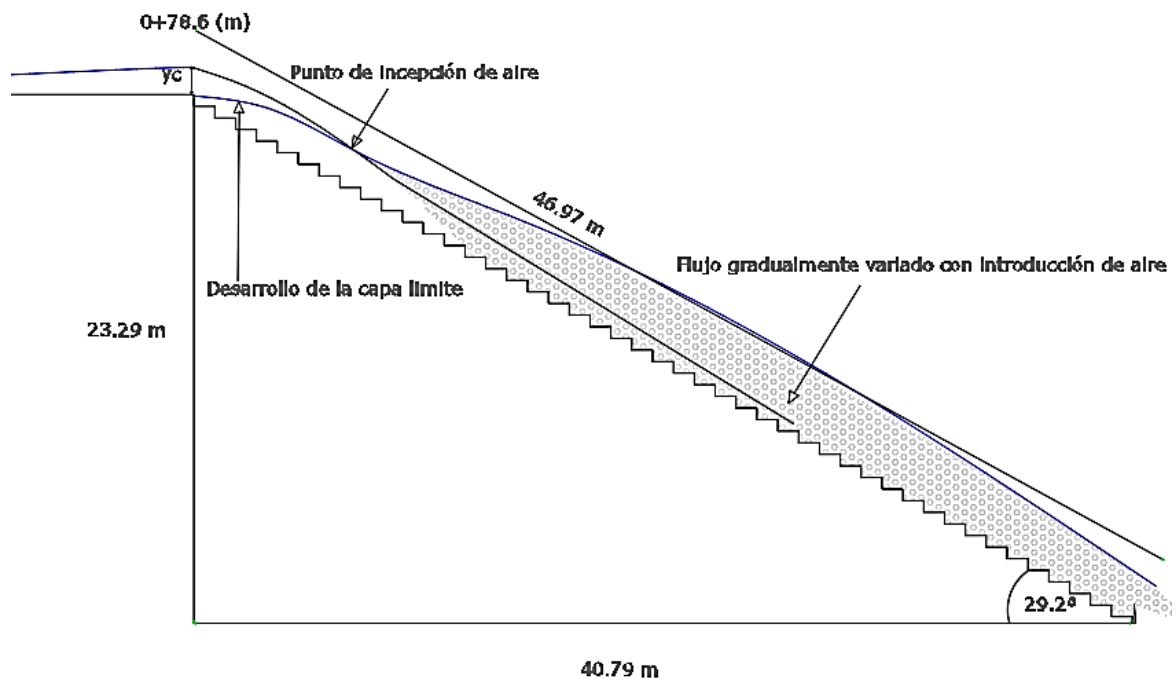
De la tabla 15, podemos observar que la energía disipada es 16.08 m, a la cual le corresponde un porcentaje de disipación de 62.86%.

En la tabla 15, se define que la velocidad real es cercana a la velocidad máxima permisible al pie de la rápida escalonada, aguas abajo, por lo tanto, cumple con la condición establecida.

Al finalizar la rápida, el agua que sale de esta, se expande en ambas direcciones del cauce, y a continuación el flujo se transporta hacia aguas abajo.

Figura 44.

Esquema del perfil escalonado.



Nota. Se observa los parámetros de la rápida escalonada. Elaborado por: Los autores.

En la figura 44, se observa que el desarrollo de la capa límite empieza desde ingreso a la rápida hasta colisionar con la superficie del flujo, y a partir del punto de incepción se desarrolla el fenómeno de introducción de aire.

La velocidad aguas abajo al pie de la rápida escalonada es de 10.42 m/s, una velocidad considerablemente menor a la de la rápida circular lisa evaluada anteriormente, por lo tanto, podemos decir que la rápida escalonada es una alternativa de solución para mejorar la disipación de energía del caudal que fluye a través de la obra de excesos de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal.

El diseño de la rápida escalonada con flujo rasante, permitirá disipar la energía del flujo de una mejor manera, por ende, disminuir la velocidad de flujo dentro o cercano a los límites ideales permisibles de velocidad.

CAPÍTULO VI

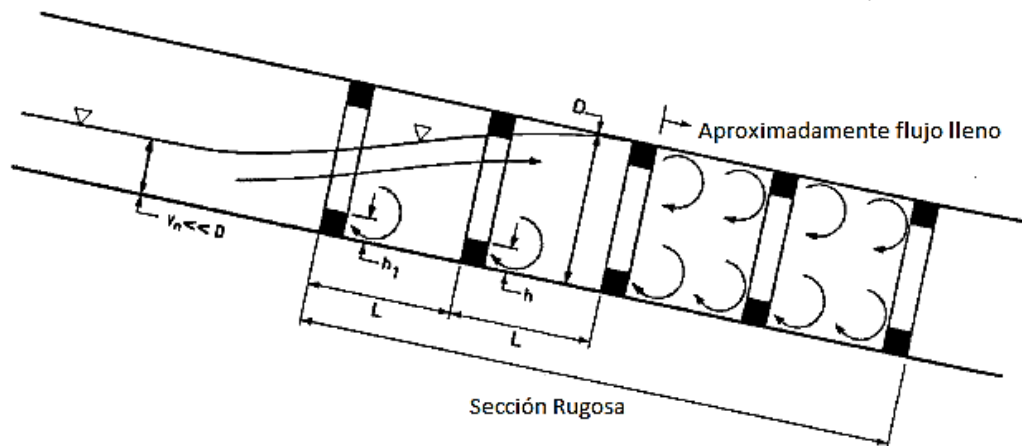
DISEÑO DE LA RÁPIDA LISA CON ELEMENTOS DISIPADORES

El estudio fue desarrollado por varios autores y científicos a lo largo de los años, los mismos que fueron recopilados y publicados en la HEC14 (Hydraulic Engineering Circular No.14) por Philip. L. Thompson and Roger T. Kilgore.

El método descrito en este capítulo ha sido únicamente probado con alcantarillas según la HEC 14, sin embargo, el objetivo del presente estudio, describe el aumento de la resistencia que generan los anillos de rugosidad, obligando que el flujo cambie de una sección parcialmente llena a una completamente llena.

Figura 45.

Esquema de una rápida anillada y su funcionamiento



Nota. Se observa la tubería circular y el funcionamiento de los elementos disipadores en el flujo.

Fuente: HEC (2014).

Se recopiló los datos a utilizar, extraídos por las condiciones existentes de la rápida en estudio e información proporcionada por la CEM Palmira-Nanegal:

Tabla 16.

Datos recopilados de los planos As-built

DATOS	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Caudal	Qd	m ³ /s	13
Diámetro de la tubería	D1	m	2.2
Longitud de la rápida	Lm	m	47.75
Pendiente de la rápida	So	%	55.88
Coeficiente de resistencia al flujo (Manning)	n	-	0.01
Aceleración de la gravedad	g	m/s ²	9.81

Nota: En la tabla se describe los datos con valores, símbolos y unidades. Elaborado por: Los autores.

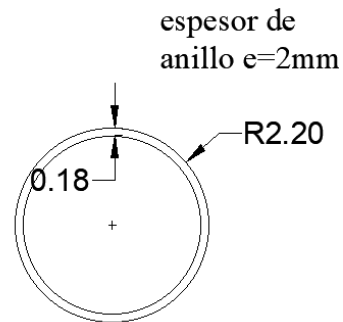
Se determinó los parámetros de diseño, los cuales pueden ser hallados en rangos por medio de las siguientes relaciones:

- $0.5 < L/D_i < 1.5$ Relación, espaciado y diámetro interno, se escogió como valor 0.8.
- $0.05 < h/D_i < 0.1$ Rugosidad relativa, se escogió 0.1.

El valor de rugosidad absoluta, la altura del elemento de rugosidad se calcula con la ecuación (61) y las anteriores relaciones citadas, como resultado se obtuvo $h = 0.18$ m.

Figura 46.

Diseño del anillo de disipación.

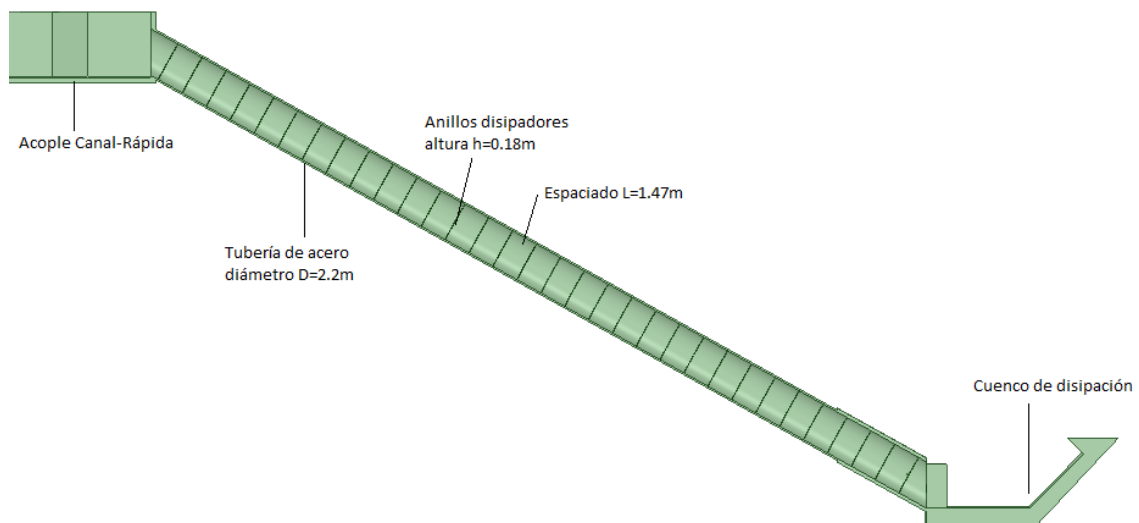


Nota. Se observa un anillo de acero con sus parámetros. Elaborado por: Los autores.

Posteriormente se extrajo el número de anillos dividiendo la longitud de la tubería para el espaciado. En consecuencia, para el análisis se consideró 32 anillos.

Figura 47.

Diseño preliminar de la distribución de los anillos en rápida de fondo liso.



Nota. Se observa el esquema de la rápida anillada con sus parámetros. Elaborado por: Los autores.

Dados los parámetros de los anillos, se determinó los coeficientes de resistencia al flujo híper turbulento $n_{HT} = 0.074$ y para el régimen de resistencia al flujo aislado $n_{IR} = 0.044$. Según recomendación del HEC 14 el valor de resistencia al flujo n es el más bajo.

Encontrados todos los parámetros que intervienen en el análisis, se resolvió hallar los parámetros de la sección de flujo y su velocidad a partir de la ecuación de Manning ya establecida en anteriores capítulos. A continuación, se detalla una tabla resumen:

Tabla 17.

Resumen de los parámetros calculados.

DESCRIPCION	SIMBOLO	UNIDAD	VALOR
punto de partida $0.5 < L/D_i < 1.5$	L/D_i	-	0,800
constante de rugosidad $0.05 < h/D_i < 0.10$	c	-	0,100
Altura del anillo	h	m	0,18
Diámetro interno	D_i	m	1,833
Espaciado de elementos	L	m	1,47
Coefficiente de arrastre	CD	-	1,90
Relación longitud/ Perímetro mojado	L_r/P	-	1,00
# de anillos	#anillos	#	32,00
Constante de conversión	α		0,0898
Manning para n IR	n IR	0,04403714	
Manning para n HT	n HT	0,07404147	0,0440
Angulo interno del círculo		θ asum	2,6388
Área del círculo mojado	A	m ²	1,3049
Perímetro mojado	P	m	2,9027
Radio hidráulico	R_h	m	0,4496
Calado	y	m	0,8264
Velocidad a salida	V	m/s	9,96

Nota: En la tabla se describe los datos con valores, símbolos y unidades. Elaborado por: Los autores.

La velocidad y el calado teórico utilizando la ecuación de Manning y el coeficiente de resistencia al flujo de Manning para flujo aislado arroja valores de $V = 9.96$ m/s² y $Y = 0.83$ m,

sabiendo que para tuberías de acero la velocidad máxima permisible es 10m/s, para flujo constante. Siendo esta una obra de excesos de uso esporádico se estaría cumpliendo con una alternativa viable.

6.1. Análisis de los regímenes de flujo

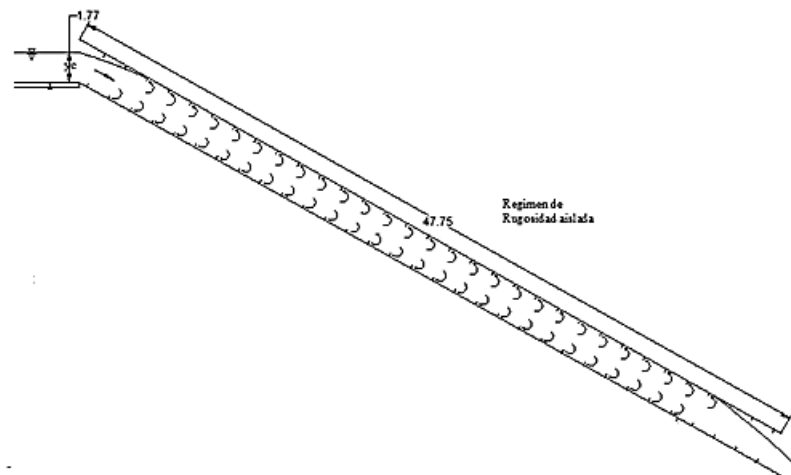
En el análisis anterior, cabe recalcar que en la publicación No. FHWA-NHI-06-086, Hydraulic Engineering Circular No.14 (HEC 14), a través de los coeficientes de resistencia al flujo se está incluyendo el proceso de aireación. Por lo que no hace falta más análisis para este procedimiento.

En el análisis del tipo de regímenes que actúan en el diseño, se ha tomado solo en consideración el régimen de flujo aislado para posteriores análisis.

A continuación, se presenta un esquema idealizando lo que ocurre en el interior de la tubería con los anillos disipadores.

Figura 48.

Esquema del perfil con el régimen calculado.



Nota. Se observa la recirculación del flujo después de cada anillo. Elaborado por: Los autores.

6.2. Análisis de la disipación de energía

Una vez realizado el prediseño de la geometría se procedió a realizar el cálculo de la disipación de energía.

Tabla 18.

Disipación de energía al pie de la rápida.

DESCRIPCION	SIMBOLO	UNIDAD	VALOR
Altura de Rápida	Hdes	m	23,29
Distancia horizontal de la rápida	L.H	m	41,68
Profundidad crítica	y_{cr}	m	1,53
Angulo inclinación	α	°	29,20
Energía total al inicio de la disipación	Hmax	m	25,58
Energía disipada	Hres	m	5,88
	Δh	m	19,70
Porcentaje de disipación		%	77,00

Nota: En la tabla se describe los datos con valores, símbolos y unidades. Elaborado por: Los autores.

Para este método de estudio se tomó la ley de conservación de energía para su solución en la cual tiene una disipación de energía de 19.70m y un porcentaje de disipación del 77,00% para la rápida con anillos disipadores.

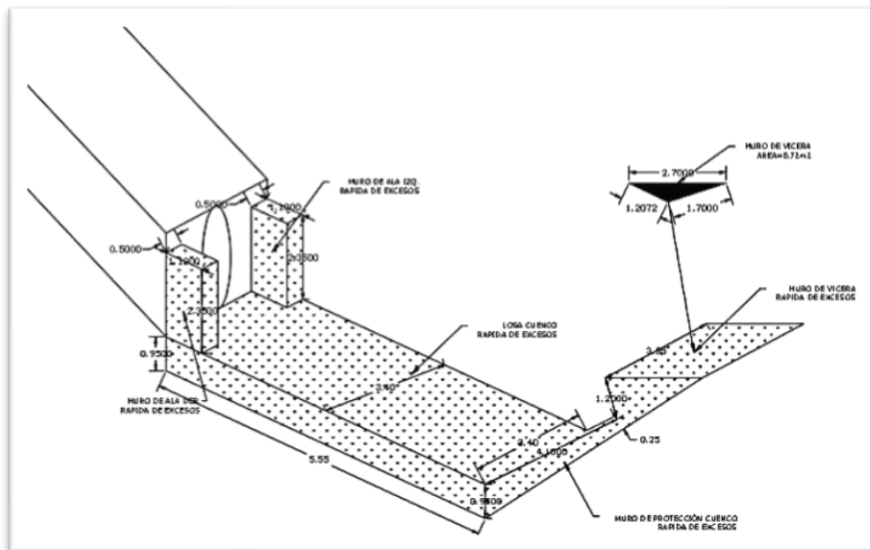
Esta configuración no ha sido probada en las rápidas con altas pendientes, por ello, se realizó en el presente estudio un modelo numérico en Ansys CFX, para la corroboración de los resultados por métodos analíticos y su correcta utilización en diferentes proyectos, tesis, etc., relacionada a obras de disipación de excesos.

6.3. Estructura de disipación en el cauce

Las alternativas propuestas (rápida escalonada y rápida con anillos), logran disipar la energía aproximadamente en $2/3$ de su energía total al inicio de la rápida, sin embargo, queda energía remanente por disipar, para ello se recomienda usar el diseño propuesto por la central hidroeléctrica, que consiste en una losa de disipación en la base del cauce, de hormigón armado $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$, y un muro de hormigón armado en el frente.

Figura 49.

Estructura de disipación propuesta por la C.E.M.



Nota. Se observa los elementos y parametros de la estructura de disipación. Fuente: Planos As Built C.E.M. Palmira-Nanegal.

Tomando en cuenta que el funcionamiento de las obras de excesos de la central hidroeléctrica es esporádico, y la energía específica se disipa en su mayoría, esta estructura cumpliría su función de manera adecuada, sin causar inconvenientes en el futuro.

6.4. Análisis del enrocado.

A parte de la estructura disipadora propuesta, se sugiere la colocación de un enrocado a continuación de la losa de disipación, como recomendación una distancia de 5 m aguas arriba y aguas abajo, el efecto de este enrocado es disipar la energía remanente ocasionada por la difusión del flujo luego del golpe de agua.

Para el análisis del enrocado existen varios métodos; Bureau Reclamation, Maynard, Ruff y Abt, entre otros. Permiten determinar los diámetros del enrocado a partir de fórmulas empíricas y complejas, sin embargo, para el presente estudio se determinó el diámetro equivalente de la roca con la fórmula descrita en la ecuación (62) y el uso de monogramas. Debido a lo mencionado se procede a determinar los datos para el cálculo:

Tabla 19.

Diámetro equivalente de la roca.

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro del enrocado	D	0.97	m
Peso específico de las rocas	γ_s	2400.00	kg/m ³
Peso de la roca	W	1100.00	kg

Nota. Se describe los datos con valores, símbolos y unidades. Elaborado por: Los autores.

En la tabla 19, se determinó el diámetro de la roca de 0.97 m y un peso de 1100 kg para el cauce aguas abajo en la obra de disipación.

CAPÍTULO VII

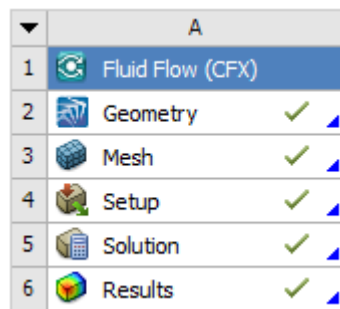
SIMULACIÓN NUMÉRICA CON ANSYS CFX

En el presente proyecto de titulación, se desarrolló la simulación numérica para todos los elementos hidráulicos, que intervienen en la disipación de energía en la rápida excesos de la Central Hidroeléctrica Palmira-Nanegal, y se realizó un análisis de obras existentes que permitieron rediseñar varias alternativas, finalmente, de ellas se seleccionó la óptima.

En el capítulo actual se describe el proceso de la simulación hasta la obtención de resultados, siguiendo con el orden grafico que se muestra en el programa; Geometría; Mallado; Configuración; Soluciones y Resultados.

Figura 50.

Esquema de las herramientas del Ansys CFX,



Nota. Se observa el orden para la modelación de software. Fuente: Ansys v 19.0.

7.1. Generación de la geometría

Para el análisis de los planos As-built proporcionados y descritos en capítulos anteriores, se procedió a realizar los Modelados en 3D en varias plataformas.

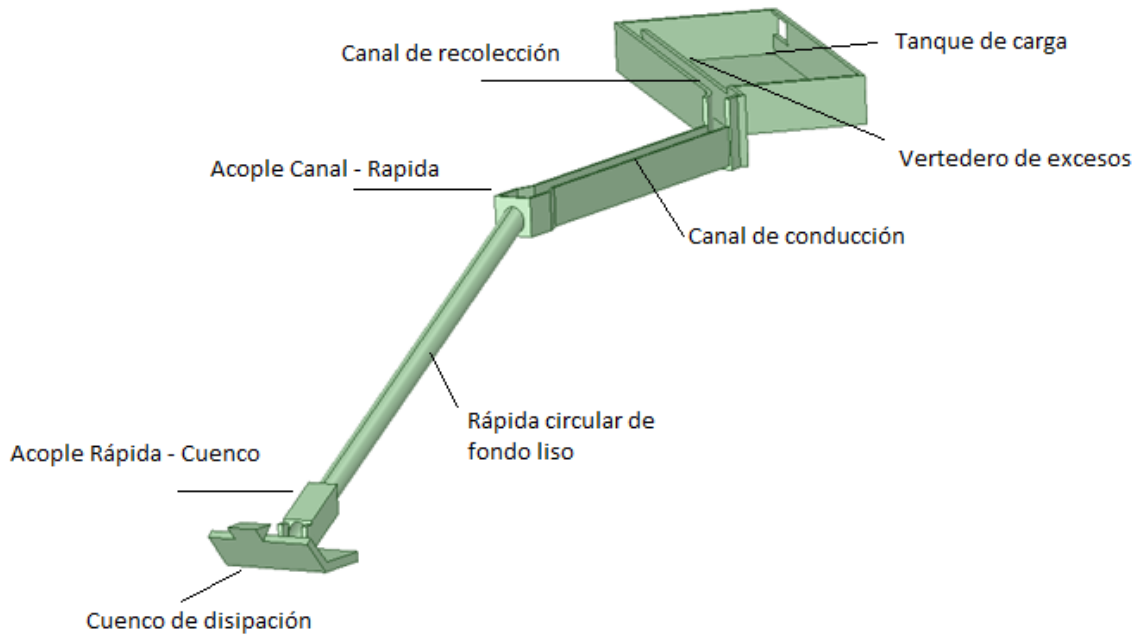
El modelado definitivo de la geometría se lo realizó en el paquete computacional Ansys v.19.0, en el módulo Fluid Flow (CFX), con su herramienta “Space Claim” para su diseño antes de la simulación.

El módulo Space Claim permite importar dibujos de otros paquetes computacionales. Para fines prácticos se realizó todo el diseño en esta herramienta.

A continuación, se detallan las obras elaboradas en 3D de la simulación:

Figura 51.

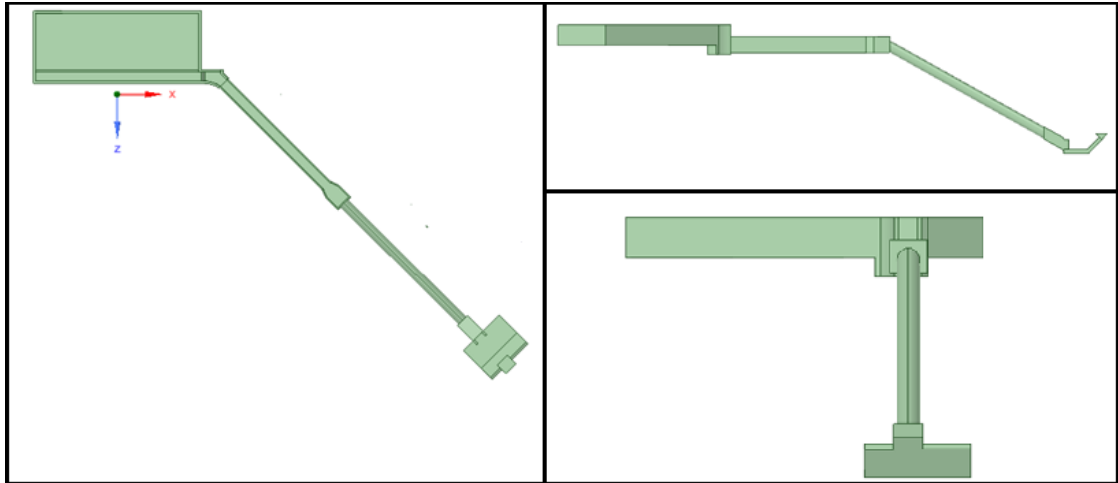
Vista en 3D de las obras actuales (rápida de tubo liso).



Nota. Se observa todas las obras que intervienen en la disipación de energía. Elaborado por: Los autores.

Figura 52.

Vistas de la Geometría creada en Space Claim para la rápida de tubo lisa y anillada.

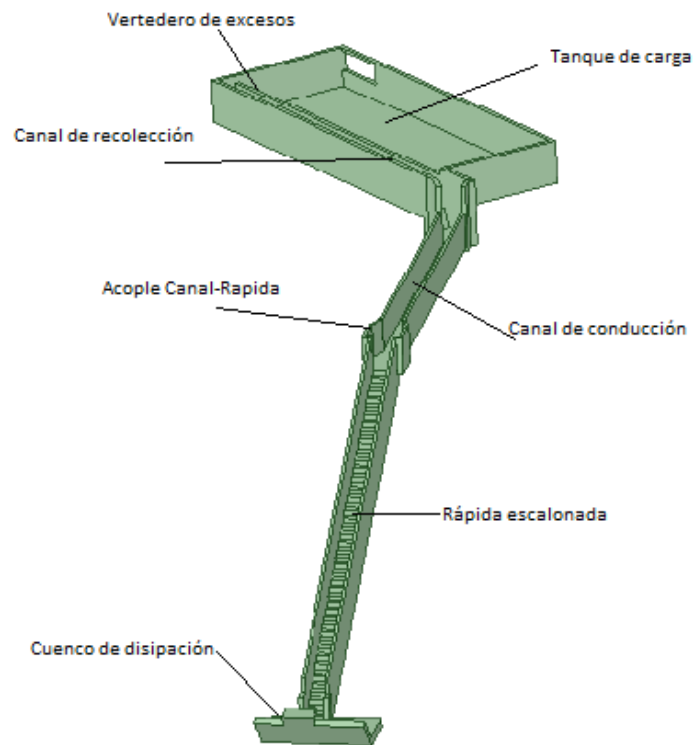


Nota. Se observa la vista en planta, lateral y frontal del esquema. Elaborado por: Los autores.

En la figura 51 y figura 52 se visualiza en el sólido 3D de las obras hidráulicas existentes con las que cuenta la central hidroeléctrica. Cabe recalcar, que para el dibujo de la geometría se cerró el acceso a la tubería a presión con una pared.

Figura 53.

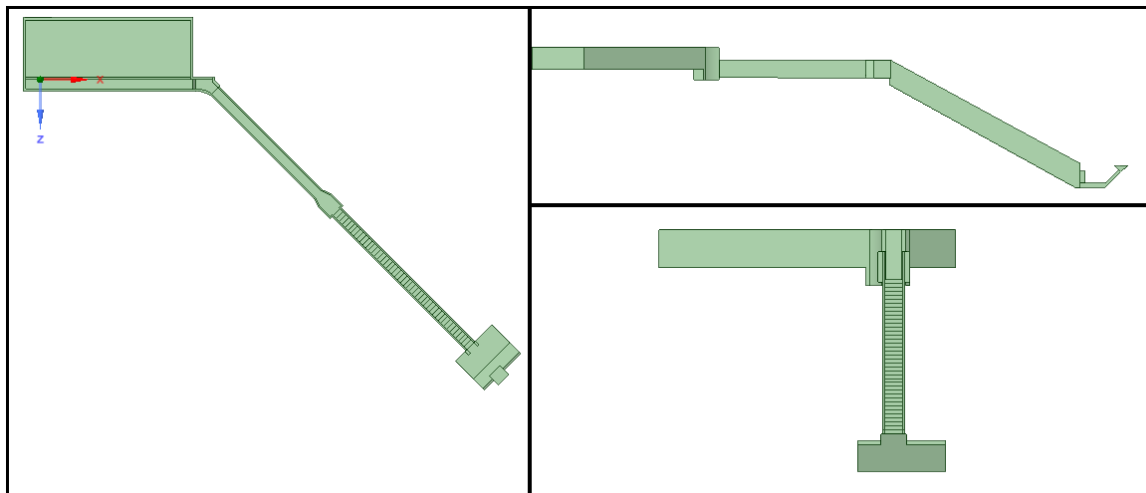
Vista en 3D de del diseño de rápida escalonada,



Nota. Se observa las obras que intervienen en la disipación de energía. Elaborado por: Los autores

Figura 54.

Vistas de la Geometría creada para la rápida escalonada en Space Claim.



Nota. Se observa la vista en planta, lateral y frontal del esquema. Elaborado por: Los autores

7.2. Generación del dominio y mallado de la estructura hidráulica

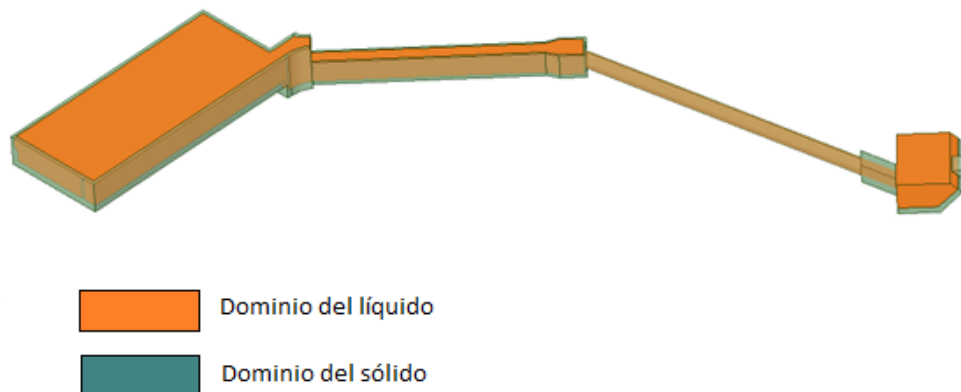
Después de generar la geometría, es necesario determinar los parámetros limitantes de la generación de un dominio y un mallado antes de la simulación numérica, por lo se detalla a continuación:

7.2.1. Dominio del fluido

Haciendo uso de la herramienta “Space Claim”, se pudo determinar las fronteras que contendrán el volumen del agua y aire, a la entrada, salida y bordes de la geometría. Este procedimiento es indispensable para posterior determinar las condiciones con la que se encuentra el líquido.

Figura 55.

Ilustración de los dominios que intervienen en las obras de excesos.



Nota. Se observa los diferentes dominios que intervienen en la modelación. Elaborado por: Los autores mediante Ansys CFX.

Se debe considerar que, para el modelado de la estructura hidráulica, el dominio del fluido es el único que detalla las condiciones de borde, el programa realiza la simulación sobre el dominio en mención. El dominio del sólido se lo representa de manera visual, ya que, no interviene en los cálculos.

7.3. Generación del mallado en el sistema hidráulico

Se realizó el mallado en el módulo *Mesh* de Ansys CFX y para poder realizarlo de manera más sencilla se introdujeron los tamaños de malla o por defecto.

Se debe considerar que es un mallado no estructurado, el cual se realizó para el dominio del fluido y para las tres opciones a analizar cómo son la rápida de tubo liso, rápida escalonada y rápida con anillos disipadores, en las cuales se configura con las siguientes características:

Para el modelado se realizó un mallado mínimo de 0.015m, un mallado máximo para las caras de 0.5m. Al igual se realizó un refinamiento de 0.015m en las superficies del dominio del líquido, que a su vez están en contacto con las paredes de hormigón y acero.

Tabla 20.

Número de elementos del mallado de las obras en estudio

Modelo	Dominio	Nodos	Elementos
Rápida de fondo liso tubería de acero	Líquido	135165	678030
	Sólido	26539	90511
	Total	161704	768541
Rápida escalonada de hormigón	Líquido	131028	677517
	Sólido	24079	82274
	Total	155107	759791
Rápida con anillos disipadores	Líquido	182021	912379
	Sólido	29410	100593
	Total	211431	1012972

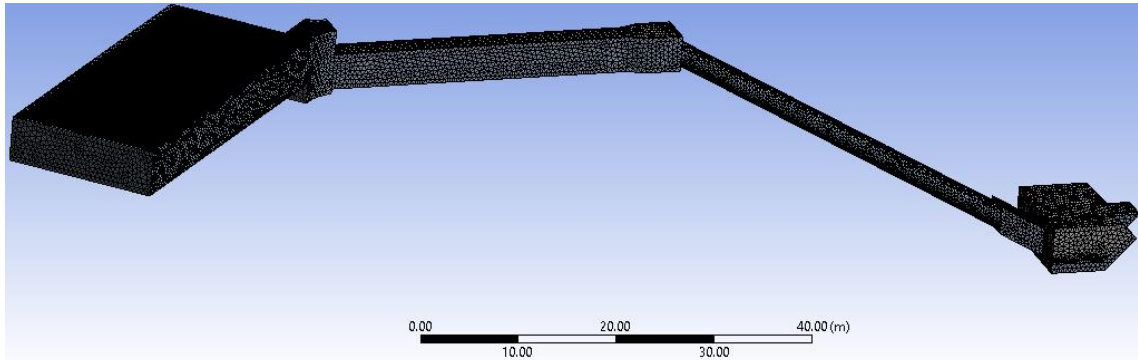
Nota. Se describe un resumen de cuantos nodos y elementos cuenta cada modelo. Elaborado por:

Los autores.

En la tabla 20. Se evidencia el mallado en los modelos numéricos desarrollados por el módulo Mesh en Ansys CFX, y se observa que la rápida con anillos disipadores usa más elementos y nodos en su malla.

Figura 56.

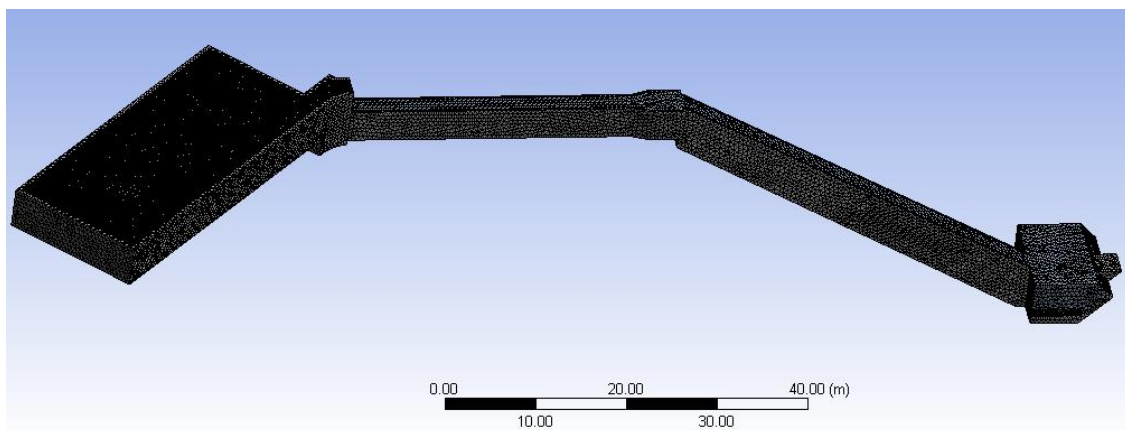
Mallado total en el modelado numérico para la rápida de tubo liso.



Nota. Se observa los volúmenes finitos de la rápida con tubo liso. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX.

Figura 57.

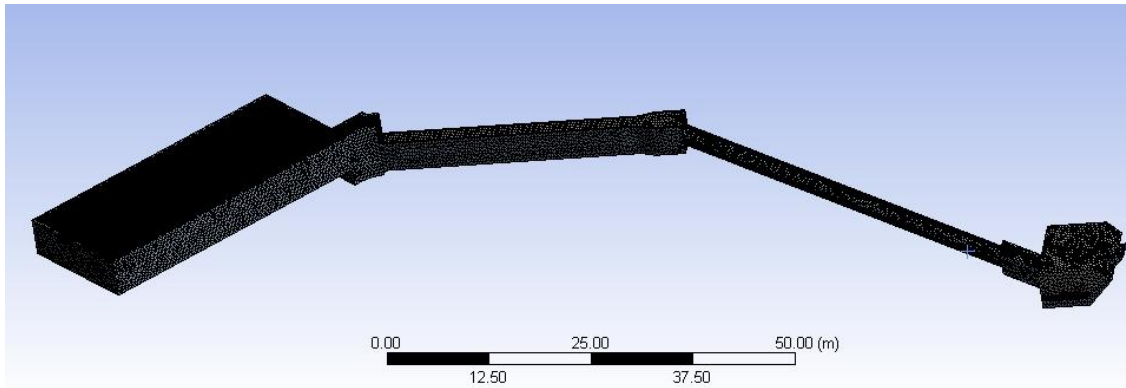
Mallado total en el modelado numérico para la rápida escalonada.



Nota. Se observa los volúmenes finitos de la rápida escalonada. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX.

Figura 58.

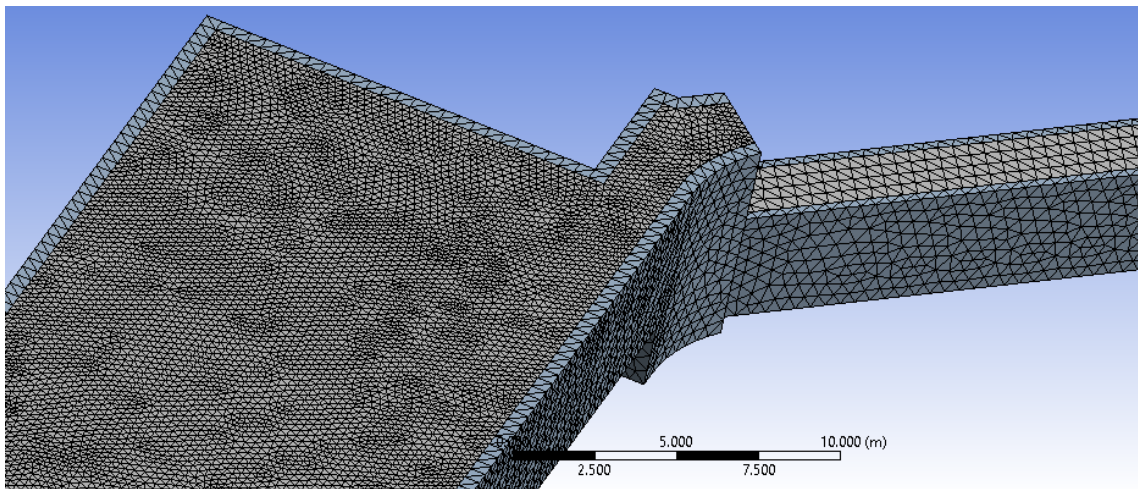
Mallado total en el modelado numérico para la rápida con anillos disipadores.



Nota. Se observa los volúmenes finitos de la rápida con anillos disipadores. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 59.

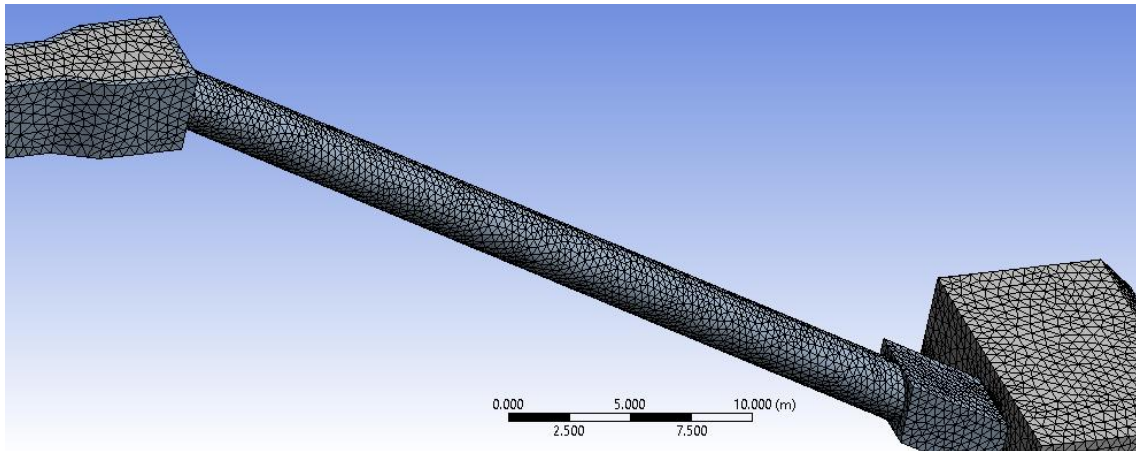
Mallado en el tanque de carga, y canales de recolección y conducción.



Nota. Se observa los volúmenes finitos de las obras hidráulicas. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 60.

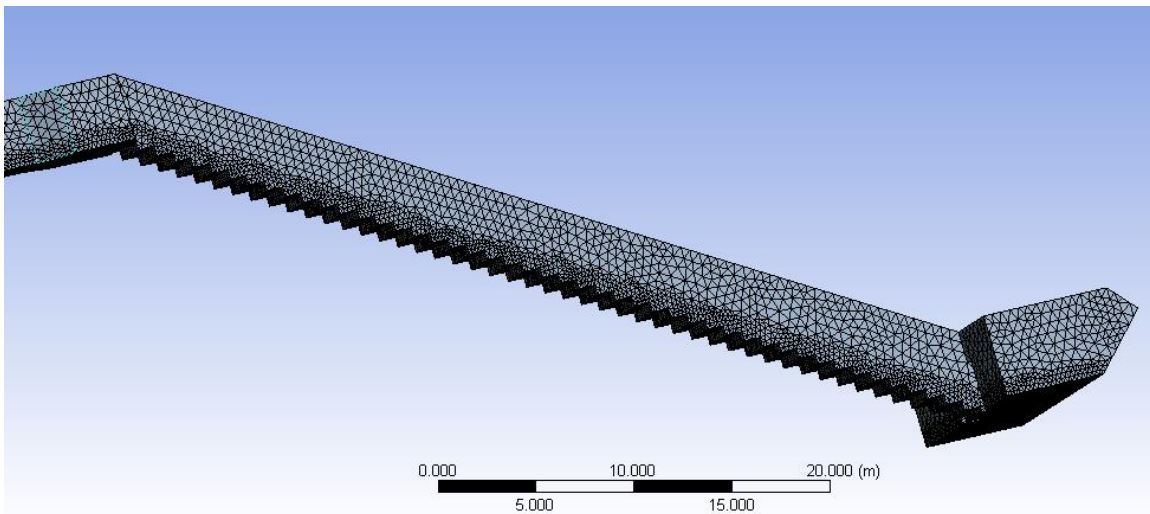
Mallado en la rápida circular lisa y cuenco de dissipación.



Nota. Se observa el mallado no estructurado de la rápida con tubo liso. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 61.

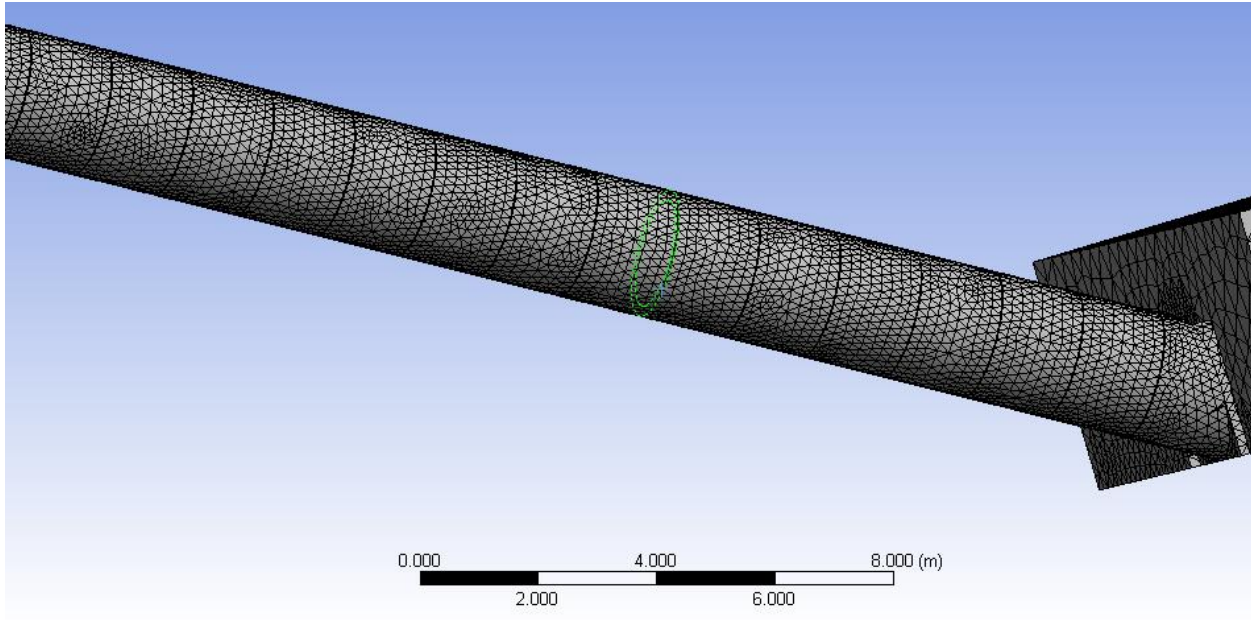
Mallado del volumen del fluido en la rápida escalonada y cuenco de dissipación.



Nota. Se observa el mallado no estructurado de la rápida escalonada. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 62.

Mallado del volumen del fluido en la rápida lisa con anillos y cuenco de disipación.



Nota. Se observa el mallado no estructurado de la rápida con anillos disipadores. Elaborado por:
Los autores a través de Ansys CFX

En los gráficos anteriormente presentados, se puede observar el tipo de mallado, cabe señalar, que para el correcto funcionamiento los nudos y las aristas deben tener continuidad de un mallado a otro, es decir, las aristas coincidan entre sí para tener una adecuada simulación.

7.4. Condiciones de borde

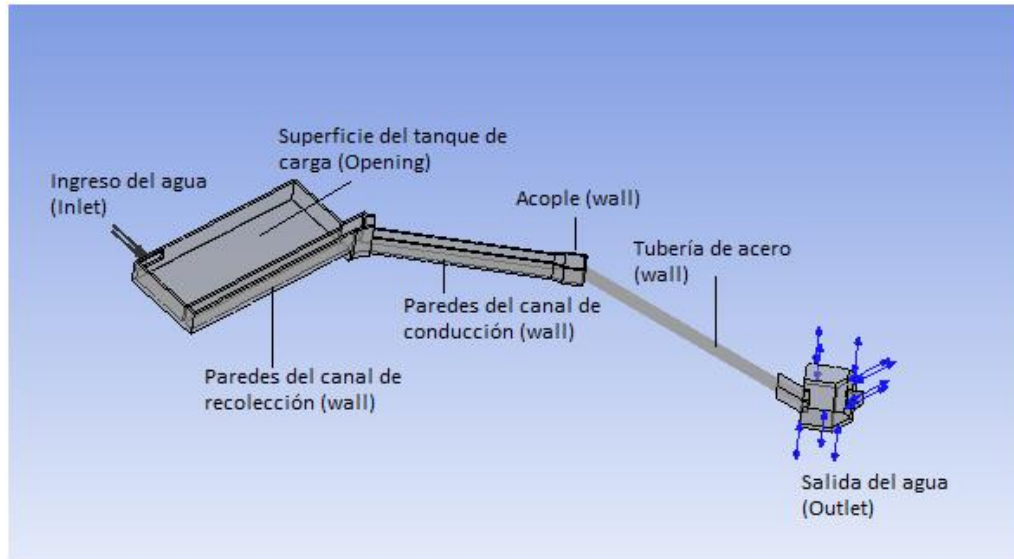
En el módulo *Setup* se configuró los parámetros de simulación en la estructura hidráulica, como por ejemplo la solución para flujo permanente, previo a la configuración de las condiciones de borde.

Las condiciones de borde son fronteras que definen el comportamiento del dominio del fluido. A continuación, se detalla las características que debe tener un el modelo para su correcto análisis:

- Fluido bifásico agua-aire, se detalló en la condición de borde con flujo continuo al ingreso del agua y también para el ingreso del aire.
- La densidad de flotabilidad de los modelos bifásicos agua-aire es de $1.2 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$.
- La presión atmosférica es de 1 [atm] .
- La fuerza de atracción gravitacional es de $9.8 \text{ [m s}^{-2}\text{]}$, en sentido negativo para el eje de las ordenadas en Y.
- El modelo de turbulencia es RNG $k - \varepsilon$, descrito en capítulos anteriores.
- No se cuenta con transferencia de calor para los intereses de estudio de esta simulación.
- La fracción volumétrica del agua a la entrada tiene un coeficiente de 1 y de aire 0.
- La turbulencia, a su ingreso y salida es Media del 5%.
- La fracción volumétrica en la superficie de contacto con el aire es 1 y agua 0.
- Para la rugosidad absoluta del acero se asumió el valor de 0.05 [mm] y del hormigón 1 [mm] .

Figura 63.

Describe las condiciones de borde aplicadas en la rápida con tubo liso usando el módulo Setup en Ansys CFX,



Nota. Se observa los parámetros por definir en el programa. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX.

7.5. Solución Numérica

El módulo *solver* realiza los cálculos de las ecuaciones diferenciales linealizadas y simplificadas a sus expresiones algebraicas citadas en capítulos anteriores.

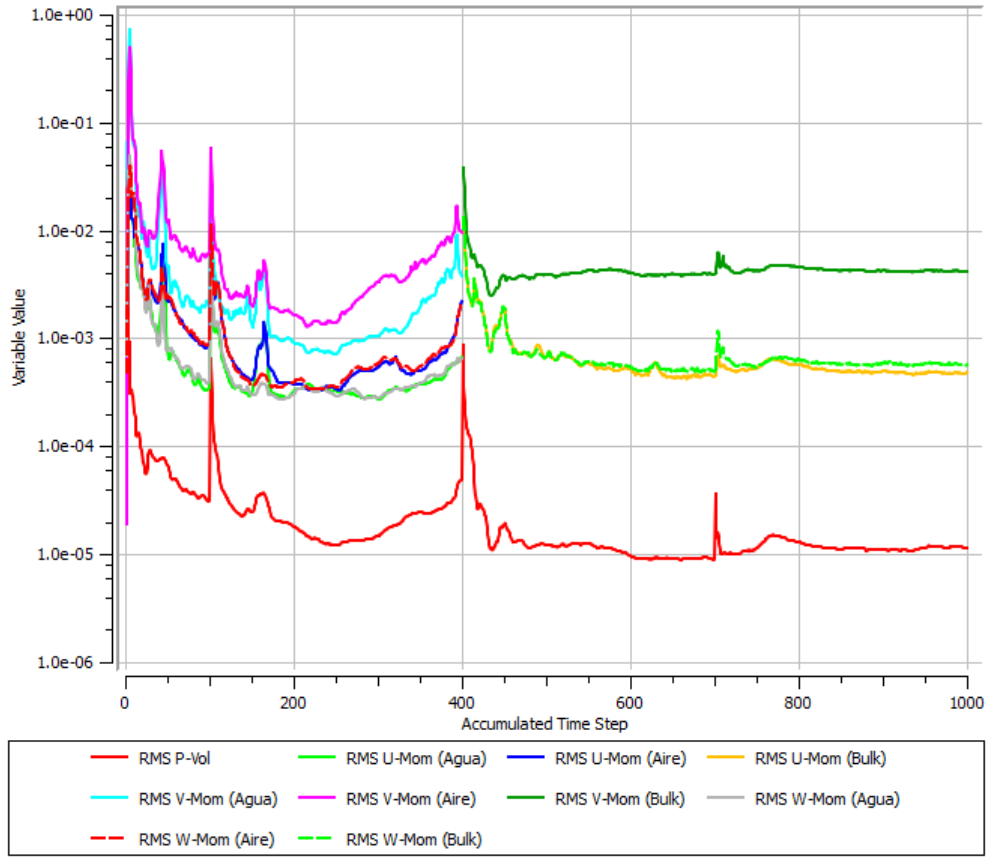
Todas las ecuaciones de conservación son analizadas a través del software y calculadas mediante iteraciones, hasta que las variables que se requieren y sus respuestas hayan alcanzado valores estables, este proceso se lo conoce como convergencia de la solución numérica.

La precisión y número de iteraciones también se las puede introducir de forma manual. Para los modelos se ha tomado 1000 iteraciones para optimizar las soluciones dadas Ansys CFX.

Para los gráficos a continuación solo se muestran los diagramas para la rápida anillada ya que todos los procesos son similares para todos los modelos.

Figura 64.

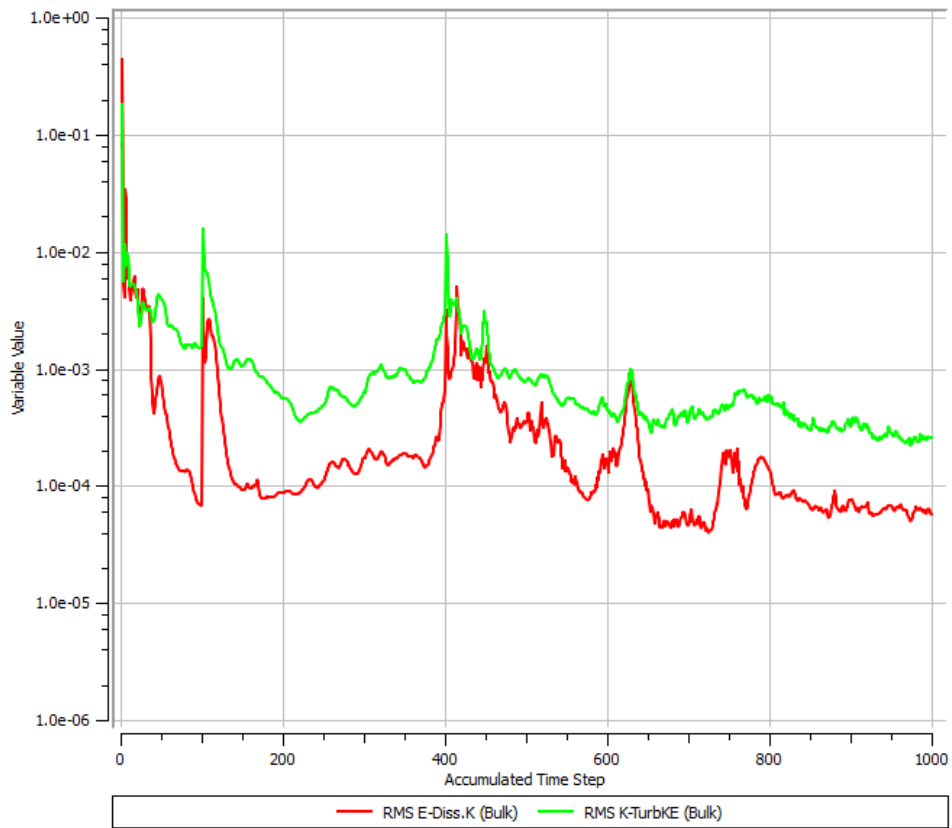
Valores residuales del Volumen y Caudal Másico,



Nota. Se estabilizan los valores entre 1.0×10^{-2} y 1.0×10^{-5} . Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX.

Figura 65.

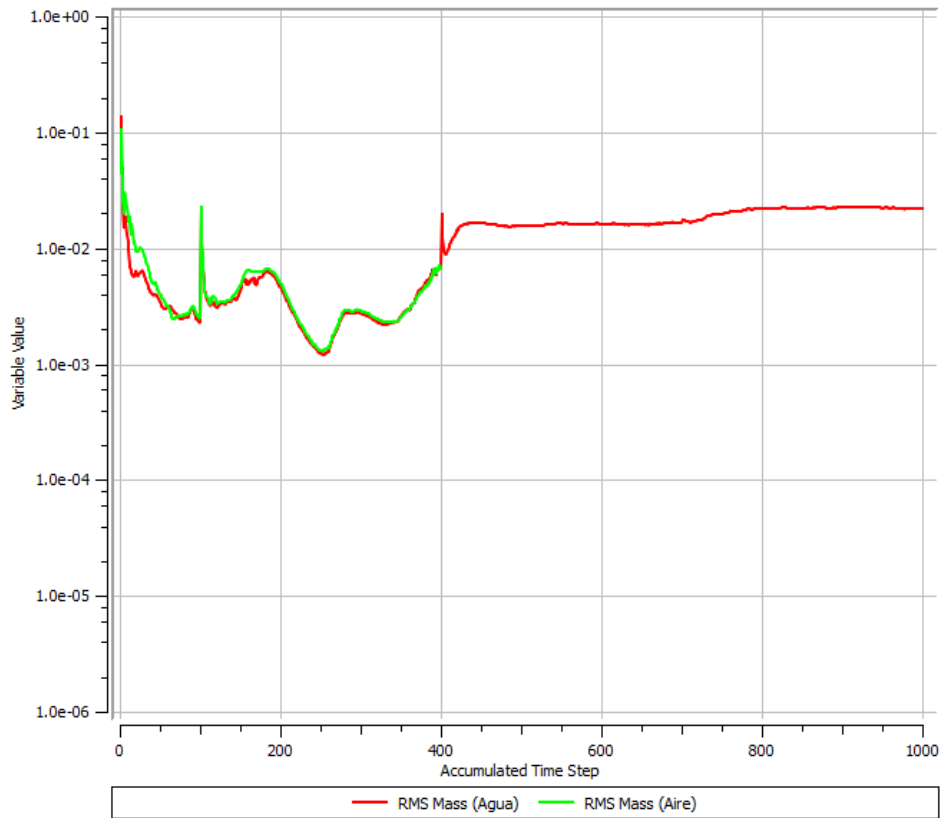
Valores residuales de la disipación turbulenta,



Nota. Se estabilizan los valores a 1.0×10^{-4} . Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX.

Figura 66.

Valores residuales para la Fracción Volumétrica,



Nota. Se estabilizan los valores a 1.0×10^{-2} . Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX.

Una vez terminado este proceso, Ansys CFX presenta el resumen del rango de valores mínimos y máximos de todas las variables, las presentamos a continuación:

Figura 67.

Resumen de los valores mínimos y máximos,

```

+-----+
|                                     |
|                               Variable Range Information                               |
|-----+-----+-----+-----+
Domain Name : Default Domain
+-----+-----+-----+-----+
| Variable Name                    | min      | max      |
+-----+-----+-----+-----+
| Aire.Density                     | 1.19E+00 | 1.19E+00 |
| Aire.Specific Heat Capacity at Constant Pre | 1.00E+03 | 1.00E+03 |
| Aire.Dynamic Viscosity            | 1.83E-05 | 1.83E-05 |
| Aire.Thermal Conductivity         | 2.61E-02 | 2.61E-02 |
| Aire.Static Entropy               | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Agua.Density                      | 9.97E+02 | 9.97E+02 |
| Agua.Specific Heat Capacity at Constant Pre | 4.18E+03 | 4.18E+03 |
| Agua.Dynamic Viscosity            | 8.90E-04 | 8.90E-04 |
| Agua.Thermal Conductivity         | 6.07E-01 | 6.07E-01 |
| Agua.Static Entropy               | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| Agua.Velocity u                   | -1.13E+01 | 2.14E+01 |
| Agua.Velocity v                   | -2.86E+01 | 8.23E+00 |
| Agua.Velocity w                   | -9.32E+00 | 1.99E+01 |
| Pressure                          | -8.17E+03 | 3.59E+04 |
| Agua.Conservative Volume Fraction | 1.00E-15 | 1.00E+00 |
| Aire.Volume Fraction              | 1.11E-15 | 1.00E+00 |
| Agua.Volume Fraction              | 1.00E-15 | 1.00E+00 |
| Agua.Turbulence Kinetic Energy    | 6.79E-07 | 1.70E+00 |
| Agua.Turbulence Eddy Dissipation  | 2.59E-07 | 1.89E+02 |
| Aire.Eddy Viscosity               | 1.69E-08 | 2.72E-02 |
| Agua.Eddy Viscosity               | 1.43E-05 | 2.29E+01 |
| Aire.Temperature                  | 2.98E+02 | 2.98E+02 |
| Agua.Temperature                  | 2.98E+02 | 2.98E+02 |
| Eddy Viscosity                    | 1.82E-06 | 6.86E+00 |
+-----+-----+-----+-----+

```

Nota. Se observa todos los resultados que intervienen en el análisis del modelado. Elaborado por:

Los autores a través de Ansys CFX.

Figura 68.

Resumen de los valores promediados.

```
+-----+
|                                     |
|                               Average Scale Information                               |
+-----+
```

Domain Name : Default Domain	
Global Length	= 1.4613E+01
Minimum Extent	= 2.9851E+01
Maximum Extent	= 1.0793E+02
Aire.Density	= 1.1850E+00
Aire.Dynamic Viscosity	= 1.8310E-05
Aire.Velocity	= 3.6395E+00
Aire.Advection Time	= 4.0151E+00
Aire.Reynolds Number	= 3.4420E+06
Aire.Mass (Conservative)	= 1.4191E+03
Aire.Mass (Normalised)	= 1.4191E+03
Aire.Volume	= 1.1976E+03
Aire.Volume Fraction	= 3.8378E-01
Agua.Density	= 9.9700E+02
Agua.Dynamic Viscosity	= 8.8990E-04
Agua.Velocity	= 3.6395E+00
Agua.Advection Time	= 4.0151E+00
Agua.Reynolds Number	= 5.9585E+07
Agua.Mass (Conservative)	= 1.9172E+06
Agua.Mass (Normalised)	= 1.9172E+06
Agua.Volume	= 1.9229E+03
Agua.Volume Fraction	= 6.1622E-01
Wave Speed	= 1.1973E+01
Froude Number	= 3.0398E-01
Domain Name : Solido	
Global Length	= 9.6409E+00
Minimum Extent	= 3.0804E+01
Maximum Extent	= 1.0881E+02
Density	= 2.7020E+03
Thermal Conductivity	= 2.3700E+02
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	= 9.0300E+02
Thermal Diffusivity	= 9.7135E-05
Average Diffusion Timescale	= 9.5688E+05
Minimum Diffusion Timescale	= 9.7687E+06
Maximum Diffusion Timescale	= 1.2189E+08

Nota. Se observa todos los resultados que intervienen en el análisis del modelado. Elaborado por:

Los autores a través de Ansys CFX.

7.6. Análisis del funcionamiento hidráulico de las obras de disipación de energía

Para un óptimo funcionamiento de las obras de excesos, se analizó todos los fenómenos que inciden después del tanque de carga. Como se explicó anteriormente para la modelación se puso una pared al ingreso de la tubería a presión hacia la casa de máquinas para

simular la parada de la central hidroeléctrica y así puedan funcionar todas las obras de excesos existentes. A continuación, se explica cómo intervienen los resultados para cada uno de los elementos en las Obras de excesos con el módulo de *Results* de Ansys CFX.

En las obras hidráulicas del presente capítulo, se consideró, que la velocidad media en una sección se determina al 40% del calado, desde el fondo del canal.

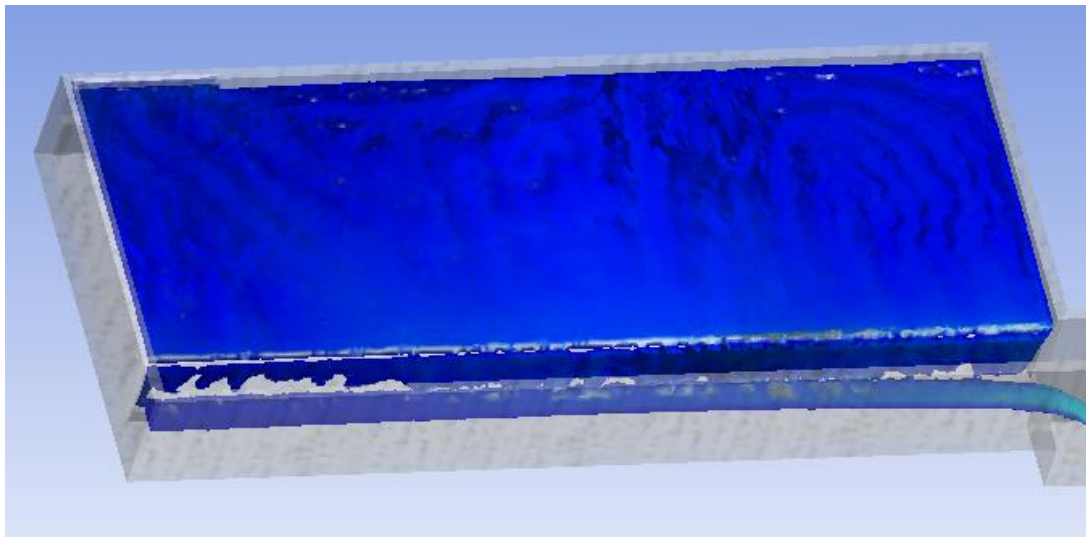
7.6.1. Evaluación del vertedero de excesos en CFD.

Su función es el desalojo del agua excedente del tanque de carga mediante un vertedero de pared ancha.

Esta estructura hidráulica tiene un tanque de carga con forma rectangular para su almacenamiento y descarga agua a un canal de recolección a través de un vertedero.

Figura 69.

Paso de agua del tanque al canal de recolección,



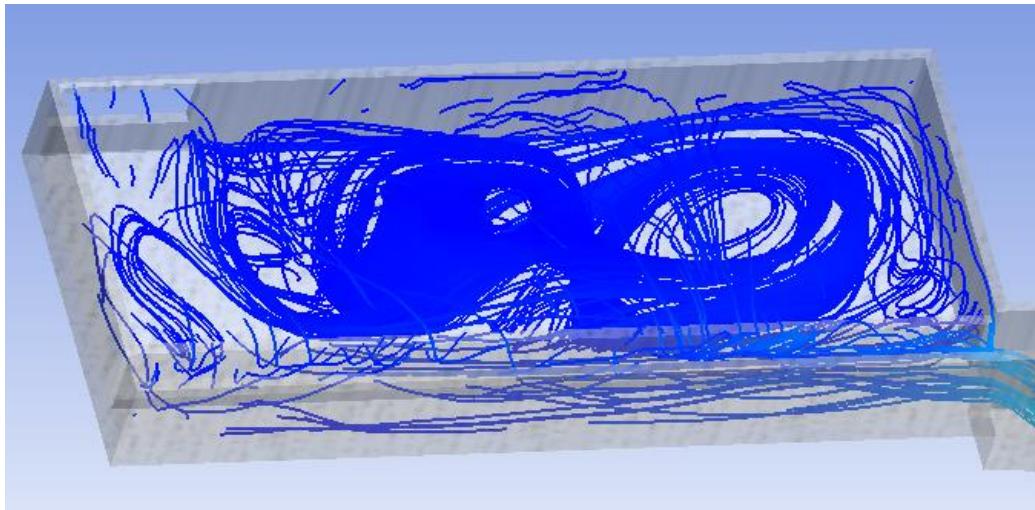
Nota. Se observa la lámina de agua en 3D. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

El gráfico mostrado anteriormente presenta la lámina de agua con fracción fluida de 50% de líquido y una fracción del 50% de aire, en el vertedero se evidencia que la mayor descarga del agua ocurre la zona derecha.

En el siguiente gráfico se podrá observar que las líneas de corriente tienen recirculación a tras del vertedero, en el tanque de carga, esto se debe al cierre en el trayecto de la tubería que llega a las casas de máquinas.

Figura 70.

Líneas de flujo.

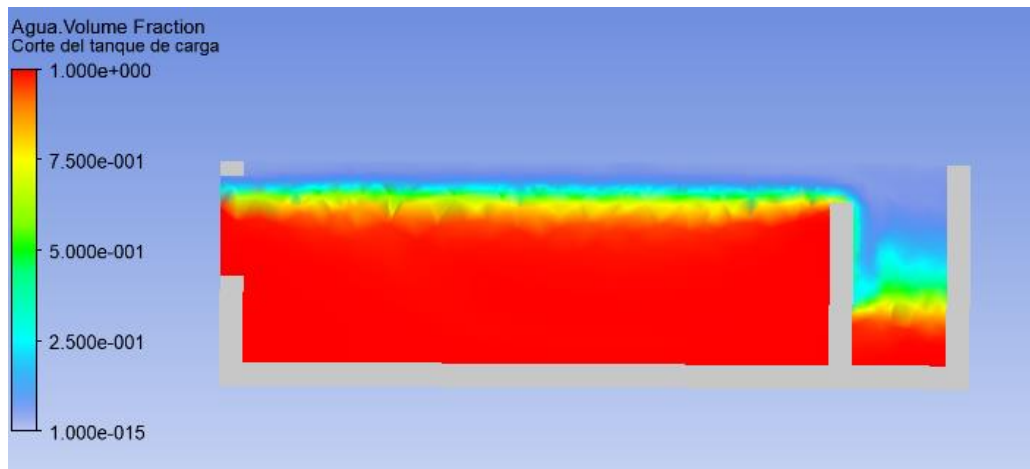


Nota. Se observa las líneas de flujo al ingreso, en el tanque de carga, vertedero y canal de recolección. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

En las figuras descritas a continuación, se muestra la distribución de la fracción fluida del agua. En la simulación ingresa un caudal de 13 m³/s; su velocidad de acercamiento al vertedero es 1.56m/s; mientras tanto la profundidad en el canal de recolección esta entre 0.4 y 1.14m.

Figura 71.

Fracción fluida a 1m del ingreso.

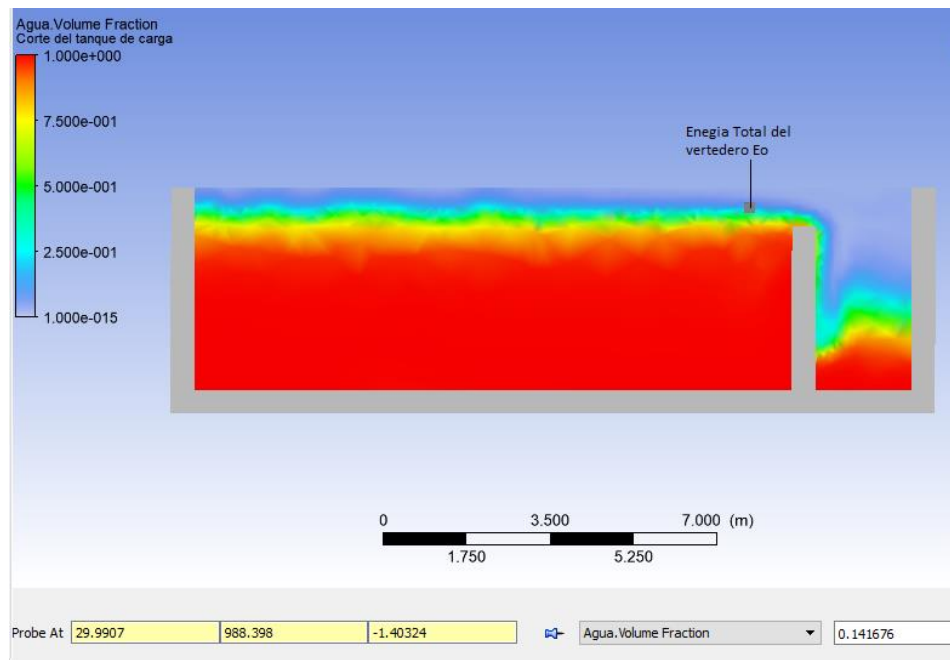


Nota. Se observa el paso del fluido por del tanque de carga, vertedero y canal de recolección

Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 72.

Fracción fluida a 30m del ingreso,

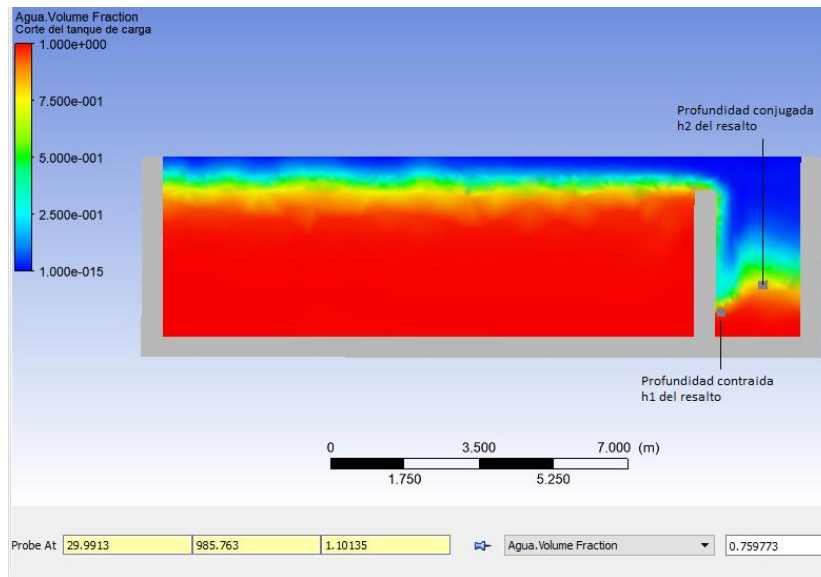


Nota. Se observa la toma de la energía total mediante la herramienta probe. Elaborado por: Los

autores a través de Ansys CFX

Figura 73.

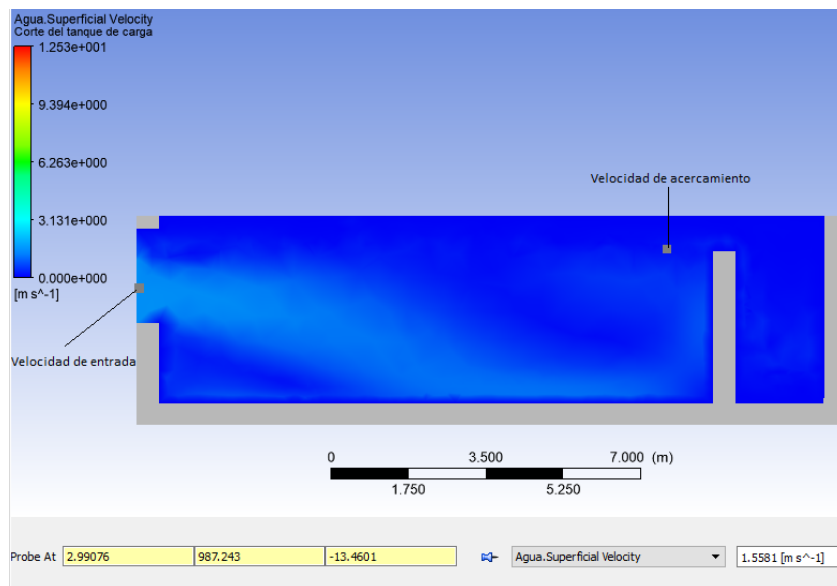
Fracción fluida a 30m del ingreso,



Nota. Se observa la toma las profundidades conjugadas mediante la herramienta probe. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 74.

Diagrama de velocidades a 3m del ingreso,



Nota. Se observa el color azul claro determina velocidades más fuertes. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Con el uso de la herramienta *Probe*, se determinó todos los parámetros que intervienen en el vertedero y se detalla en la tabla a continuación:

Tabla 21.

Parámetros hidráulicos del vertedero.

Cota fondo del canal		984.62m		
Descripción		Símbolo	Valor	Unidad
Energía total del vertedero		E	3.78	m
Velocidad al ingreso del tanque de carga		V	1.56	m/s
Velocidad de acercamiento		Vo	0.12	m/s
Profundidad	contraída resalto	h1	0.40	m
Profundidad	conjugada resalto	h2	1.14	m

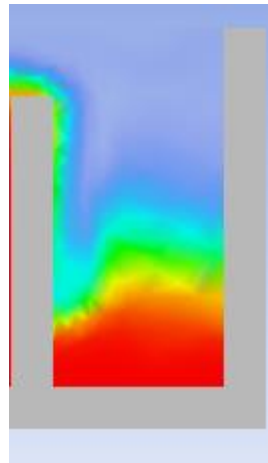
Nota: Datos tomados a través del modelado en Ansys CFX. Elaborado por: Los autores.

7.6.2. Canal de recolección

En el canal de recolección, desde aguas arriba hacia aguas abajo, se observa que su pendiente no es muy pronunciada, es leve, no supera el 0.32%. Todos los parámetros geométricos son los establecidos en capítulos anteriores. A continuación, se presenta el corte del canal ya simulado para la fracción volumétrica del líquido.

Figura 75.

Corte transversal del canal de recolección.

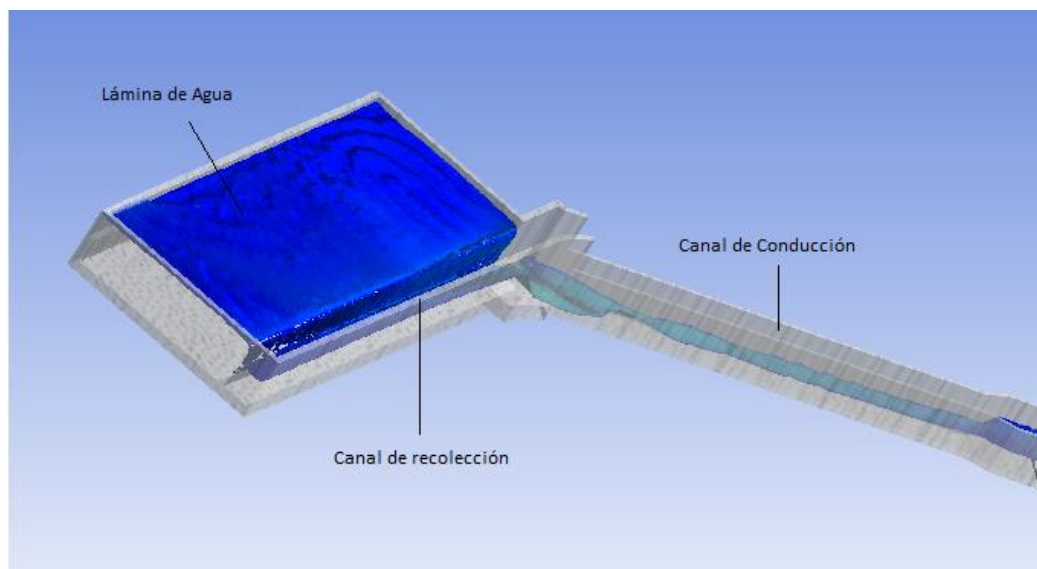


Nota. Se observa un corte a 30m iniciado el canal de recolección. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

A continuación, se visualiza donde se localiza el canal de recolección en las obras de excesos:

Figura 76.

Vista en 3D del canal de recolección.

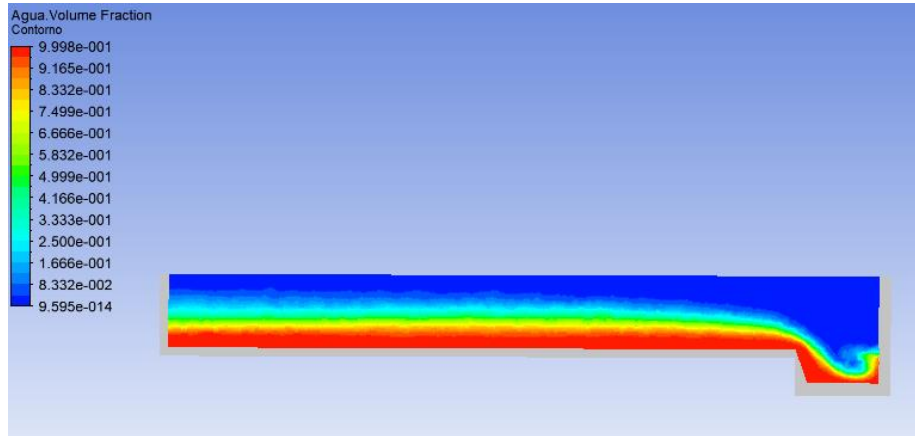


Nota. Se observa el paso de agua por el canal. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Para determinar el perfil del flujo del canal de recolección en el módulo *Results* se usó la herramienta “*Plane*” para generar el corte y los contornos que permiten apreciar de mejor manera los resultados. A continuación, se detalla el perfil simulado y sus parámetros.

Figura 77.

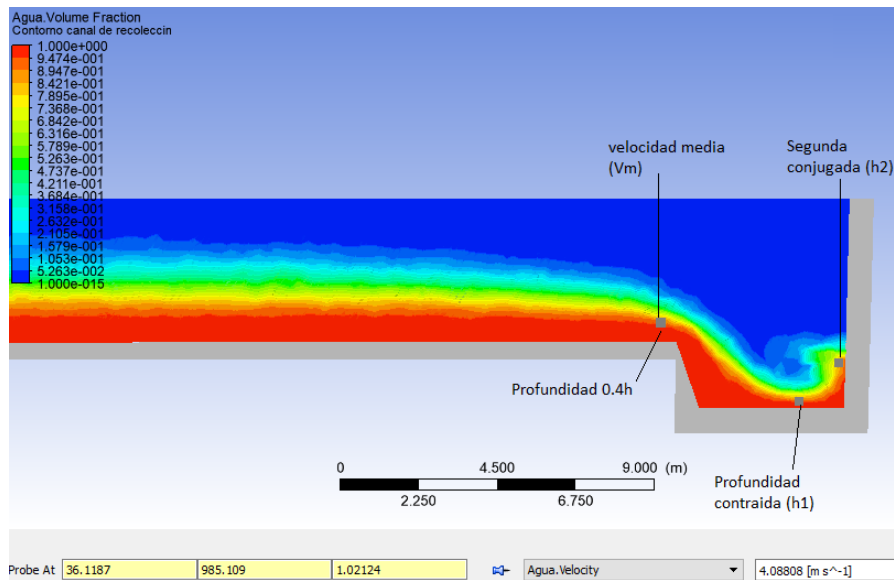
Perfil de flujo del canal de recolección.



Nota. Se observa el contorno del perfil. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 78.

Perfil de flujo y sus parámetros del canal de recolección.



Nota. Se observa la toma de sus valores mediante la herramienta probe. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Establecido el perfil del canal de recolección, se tomó las cotas de diseño reales para determinar las profundidades.

Tabla 22.

Parámetros del canal de recolección

Cota fondo del canal recolección		984.47		
Cota fondo del canal conducción		982.57		
	Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
	Velocidad	V	4.088	m/s
	Calado	Y	1.600	m
	Energía total	E	3.884	m
	Profundidad contraída	h1	0.648	m
	Segunda conjugada	h2	2.208	m

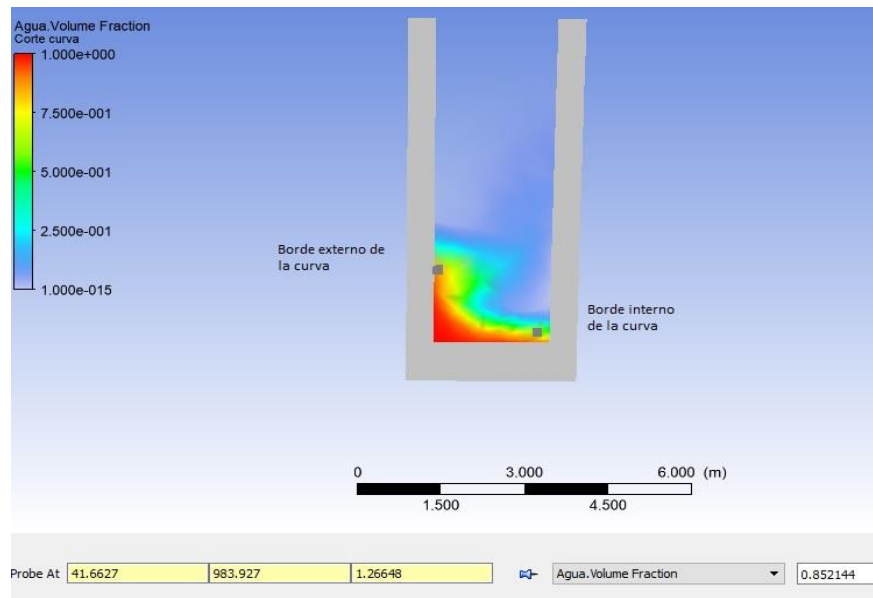
Nota: Datos tomados a través del modelado en Ansys CFX. Elaborado por: Los autores

En la tabla 22, se determinó los parámetros del canal de recolección, se obtuvo como primera conjugada del resalto hidráulico 0.287 m y segunda conjugada del resalto hidráulico 1.411 m. También se determinó la velocidad y el calado en el cambio de pendiente, sabiendo que en ese punto es la sección de control.

La imagen a continuación detalla el corte en la curva antes del ingreso al canal de conducción de excesos, en el cual se observa la sobreelevación existente entre la cara interna y externa de la curva.

Figura 79.

Curva antes del canal de conducción.



Nota. Se observa el corte a 3m iniciada la curvatura. Elaborado por: Los autores a través de Ansys

CFX

Tabla 23.

Parámetros de la sobre elevación

Cota fondo del canal conducción	982.57		
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Profundidad externa	y1	1.357	m
Profundidad interna	y2	0.383	m
Sobre elevación	Δh	0.974	m

Nota: Datos tomados a través del modelado en Ansys CFX. Elaborado por: Los autores

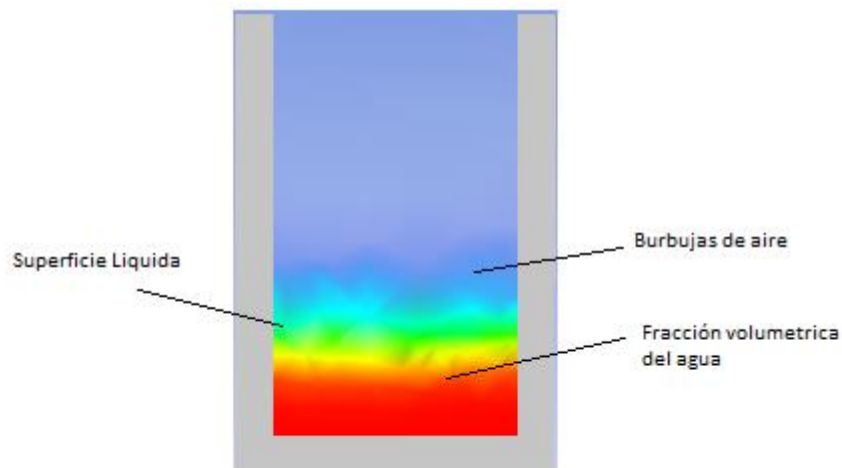
En la tabla 23. Se evidencia una sobre elevación entre la cara interna y cara externa es de 0.97m

7.6.3. Canal de conducción de excesos.

A continuación, se presenta el corte a 15m del canal ya simulado para la fracción volumétrica del líquido, el cual está representado con un código de colores por defecto del programa, entre los colores rojo, amarillo y verde destacan el volumen de fluido, en cambio el color azul es la mezcla agua-aire.

Figura 80.

Corte transversal del canal de conducción de excesos a 15m iniciado el canal.

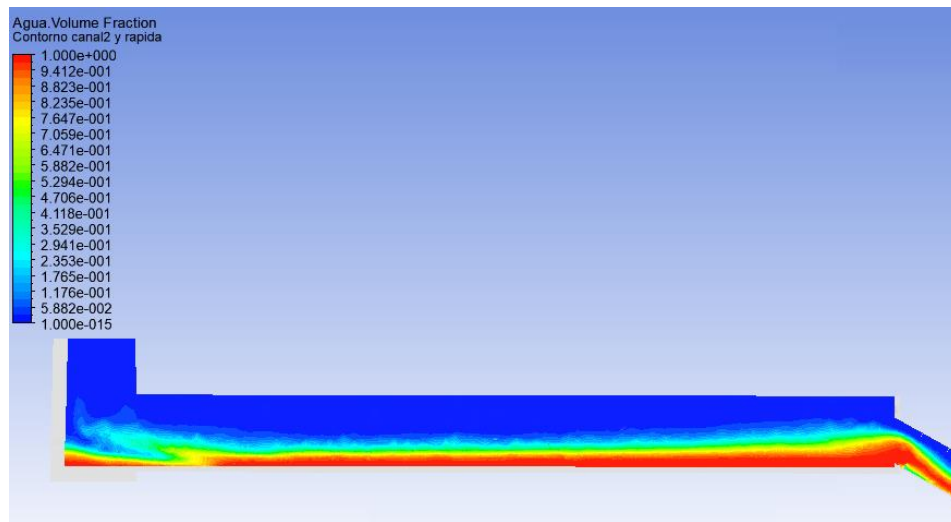


Nota. Se observa la fracción fluida de líquido. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Para determinar el perfil del flujo del canal de conducción, en el módulo *Results* se usó la herramienta “*Plane*” para generar el corte y los contornos que permiten apreciar de mejor manera los resultados. A continuación, se detalla el perfil simulado y sus parámetros.

Figura 81.

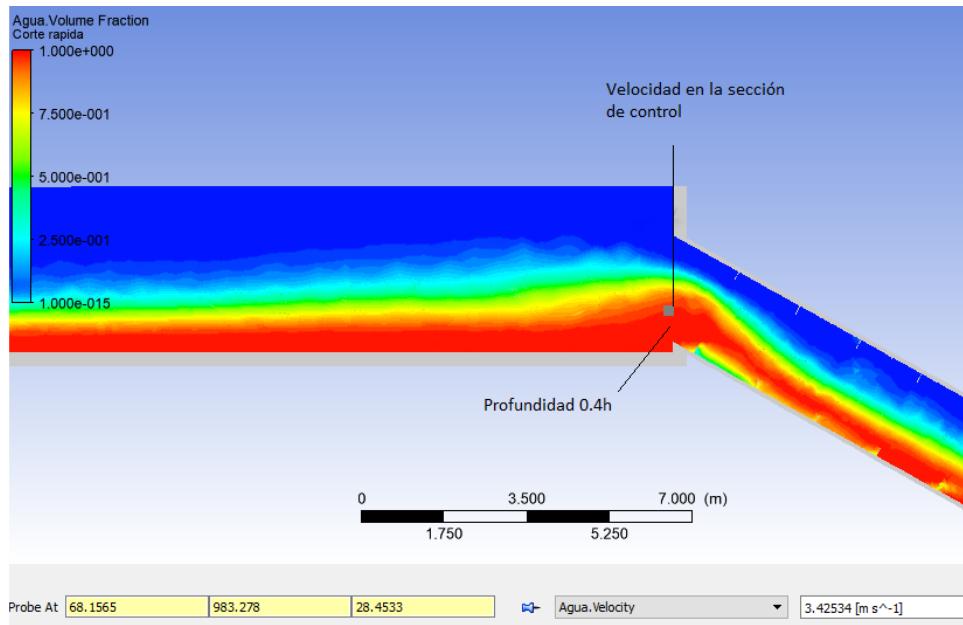
Perfil de flujo del canal de conducción de excesos.



Nota. Se observa el contorno del perfil de la fracción fluida de líquido. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 82.

Perfil de flujo y sus parámetros del canal de conducción excesos antes del ingreso a la rápida



Nota. Se observa la toma de sus valores mediante la herramienta probe. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Tabla 24.

Parámetros del canal de conducción de excesos

Cota fondo del canal conducción		982.47		
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad	
Velocidad media	Vm	3.425	m/s	
Calado	Y	2.020	m	

Nota: Datos tomados a través del modelado en Ansys CFX. Elaborado por: Los autores

En la tabla 24, se determinó la velocidad y el calado a la salida del canal, sabiendo que por definición su sección de control se encuentra en el cambio de pendiente entre el canal de conducción y la rápida de excesos, siempre y cuando, el flujo sea subcrítico.

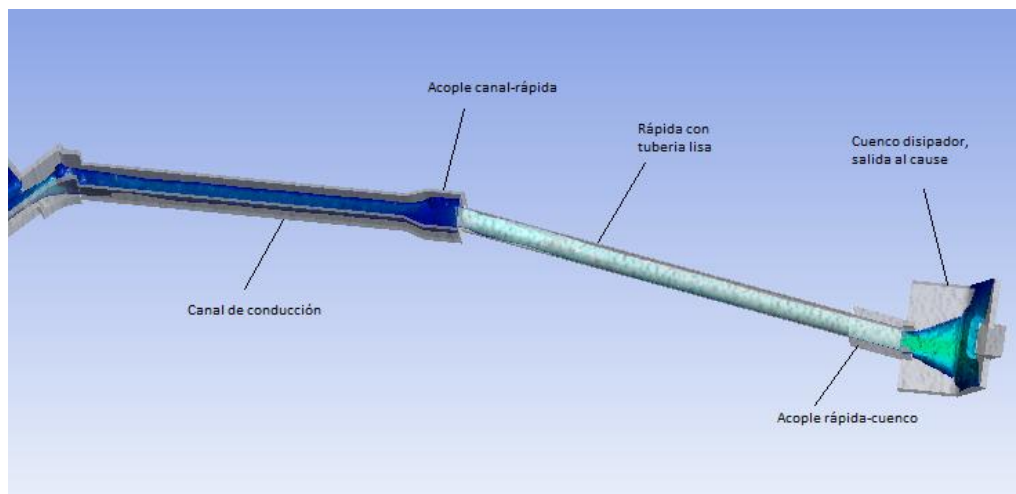
7.6.4. Modelación de la rápida con tubo liso existente

La función principal de la rápida de excesos es evacuar el agua excedente del tanque de carga, para el siguiente análisis se tomó en consideración el diseño inicial, con el que cuenta actualmente el sitio de estudio en cuestión.

A continuación, se muestra las obras hidráulicas que intervienen en la rápida de excesos:

Figura 83.

Vista en 3D de la rápida de excesos.

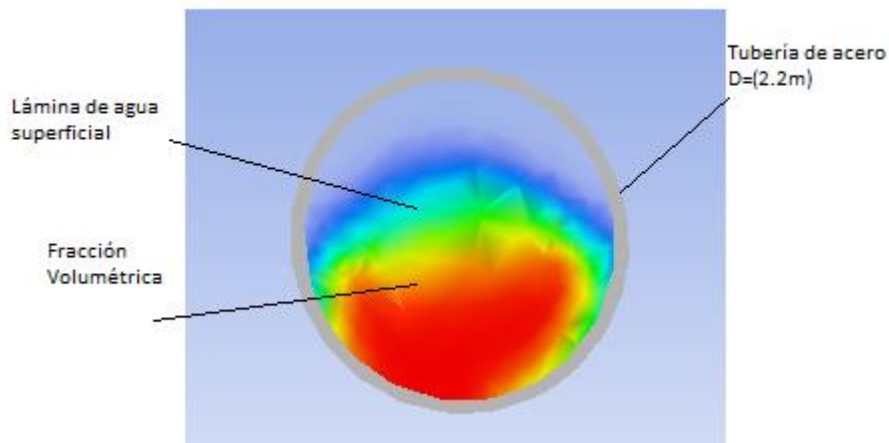


Nota. Se observa los elementos que componen a la rápida. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

En la figura 84, se puede ver la fracción fluida a 3m al inicio de la rápida, y se nota que ocupa más o menos el 70% del tubo, esta se va reduciendo mientras el flujo avanza en la tubería circular lisa ya que tiene una pendiente del 55.8%.

Figura 84.

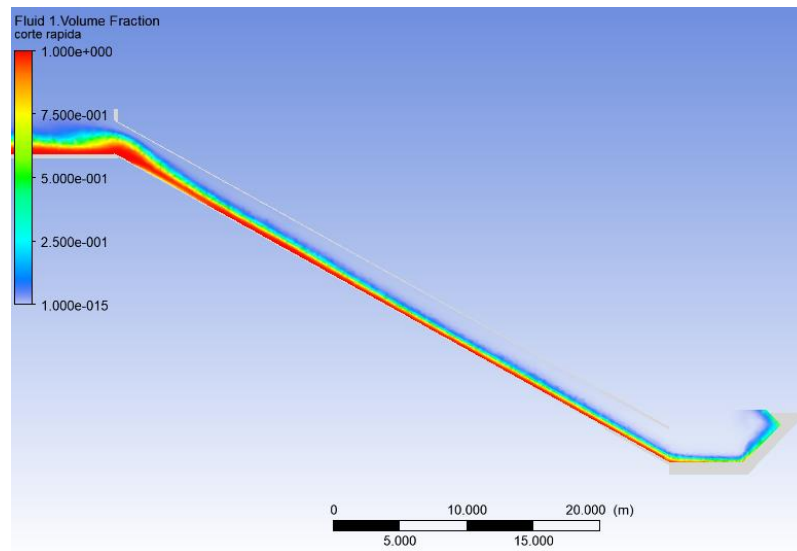
Corte trasversal de la rápida lisa.



Nota. Se observa la fracción fluida de líquido en la tubería cerrada. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 85.

Perfil de flujo de la rápida lisa, Corte transversal.

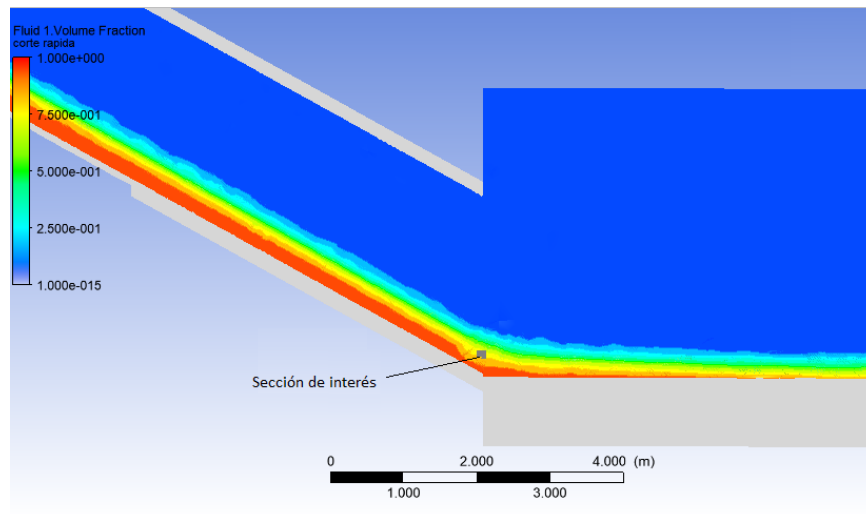


Nota. Se observa el corte de la fracción fluida en la rápida. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

En la figura 86, se visualiza la fracción fluida al fondo de la rápida con la que se aprecia un calado relativamente pequeño, pero con una velocidad media muy alta.

Figura 86.

Perfil de flujo de la rápida lisa, Corte transversal.

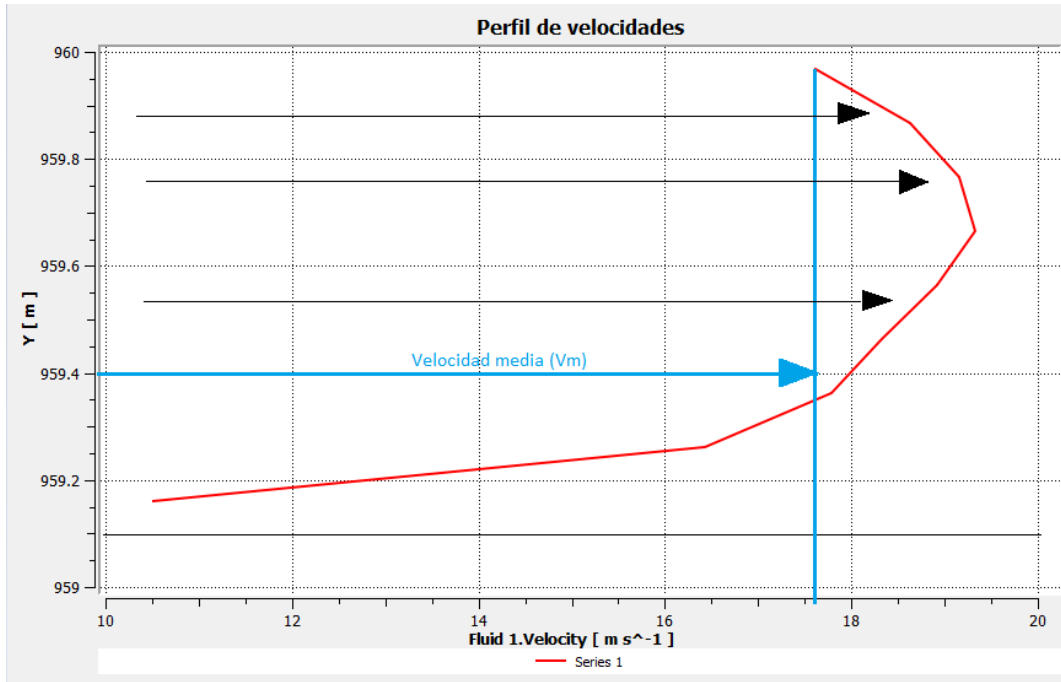


Nota. Se toma datos en la sección de interés. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Mediante la herramienta “Chart” se determinó el perfil de velocidades de la rápida circular lisa, y se obtuvo una velocidad media de $V_m = 17.60 \text{ m/s}$ a la salida de la tubería.

Figura 87.

Perfil de velocidades de la rápida lisa.



Nota. Se muestra el diagrama de velocidad vs el calado en la sección de interés. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Tabla 25.

Resultados al fondo de la rápida circular lisa

Cota fondo del Rápida lisa		959.06	
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad a la salida	V_m	17.60	m/s
Calado	Y	0.78	m

Nota: Datos tomados a través del modelado en Ansys CFX. Elaborado por: Los autores

En la tabla 25, se determinó el valor de la velocidad media de 17.60 m/s a la salida de la tubería y el calado de 0.78 m.

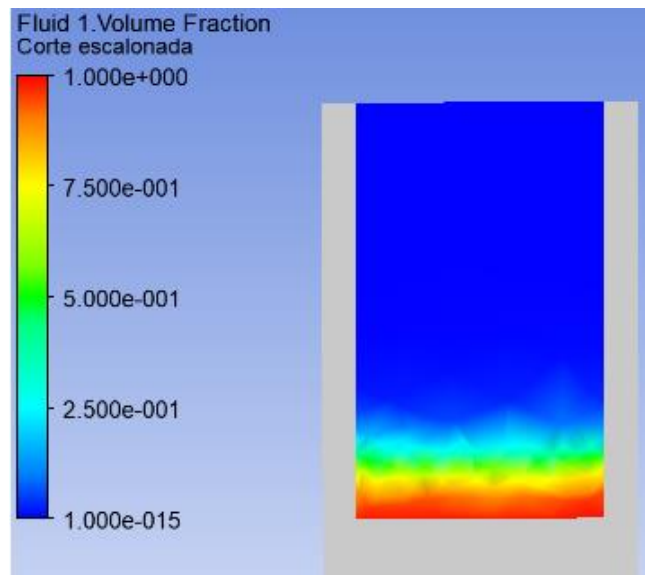
7.6.5. Modelación de la rápida escalonada

Como alternativa de diseño se ha modelado la rápida escalonada con flujo rasante, este modelo se diseñó completamente de hormigón armado con geometría rectangular.

A continuación, se observa el corte transversal sobre el escalón #11, aproximadamente a 11 metros al iniciar la rápida escalonada.

Figura 88.

Corte frontal de la rápida escalonada a 11m.

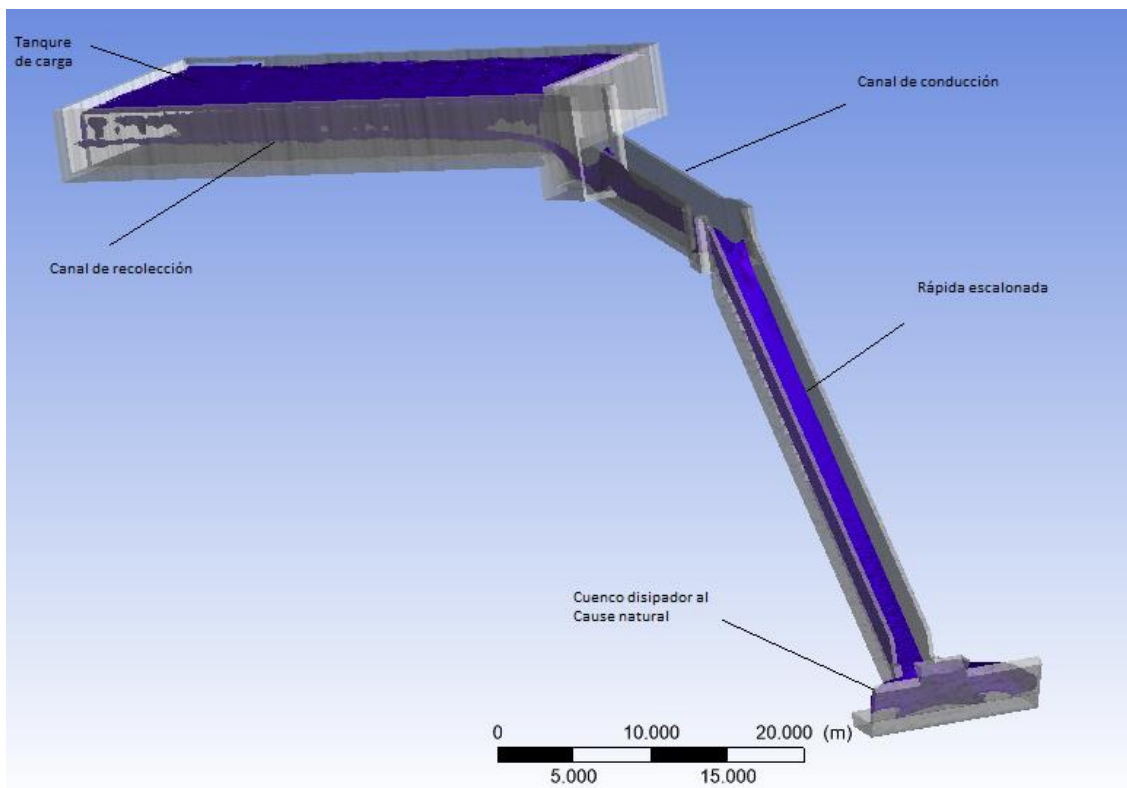


Nota. Se observa la fracción fluida de líquido en la rápida escalonada. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

En la figura 89, se presenta una imagen en 3D en la que se muestran todas las obras que intervienen en la rápida escalonada.

Figura 89.

Vista en 3D de la rápida escalonada.

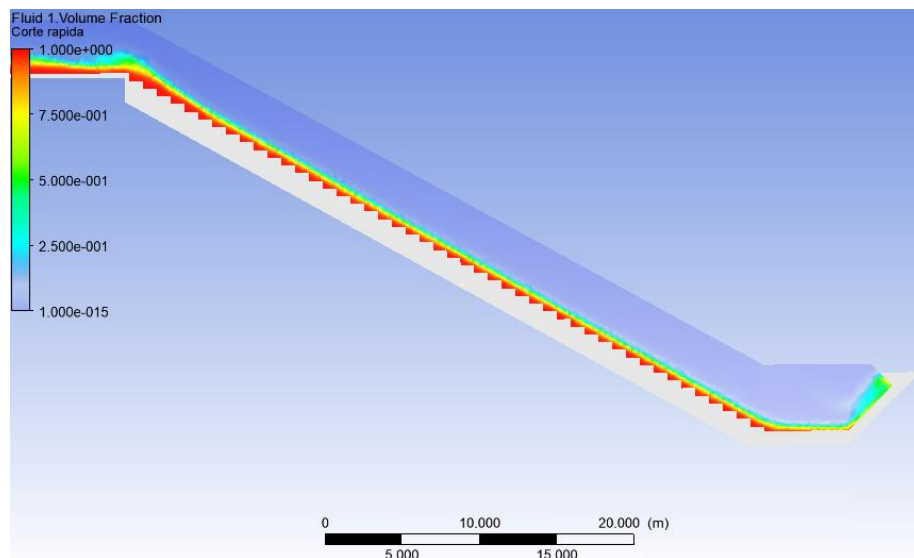


Nota. Se observa todas las obras hidráulicas que intervienen en la rápida escalonada. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

A continuación, se determinó el perfil de flujo de la rápida escalonada para la fracción volumétrica del fluido, detallando el punto de interés a la salida para constatar con que velocidad y calado llega aguas abajo.

Figura 90.

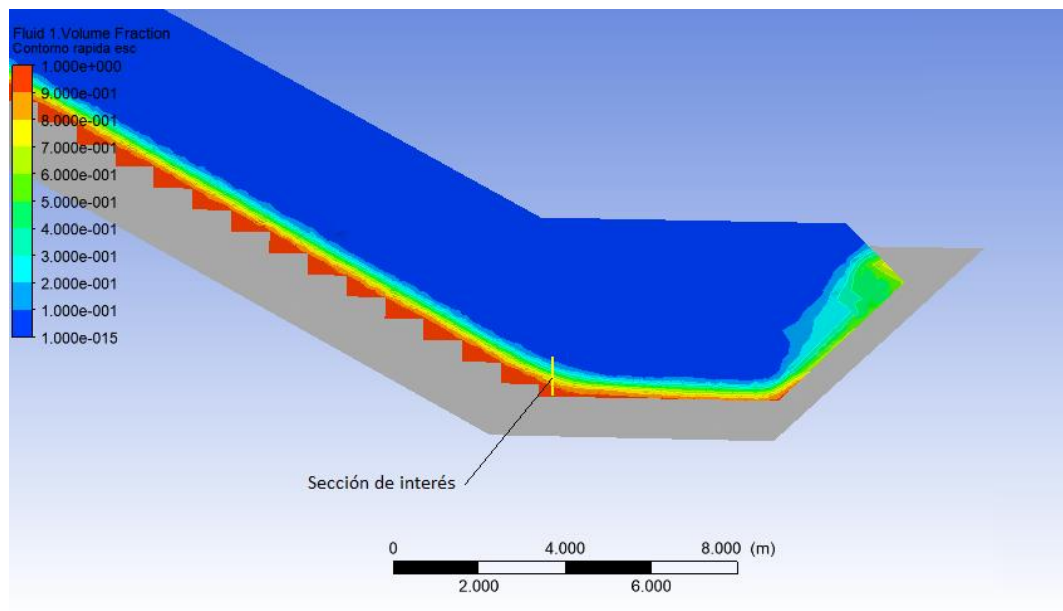
Perfil transversal de la rápida escalonada.



Nota. Se observa el corte de la fracción fluida en la rápida escalonada. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 91.

Perfil transversal de la rápida escalonada a la salida.

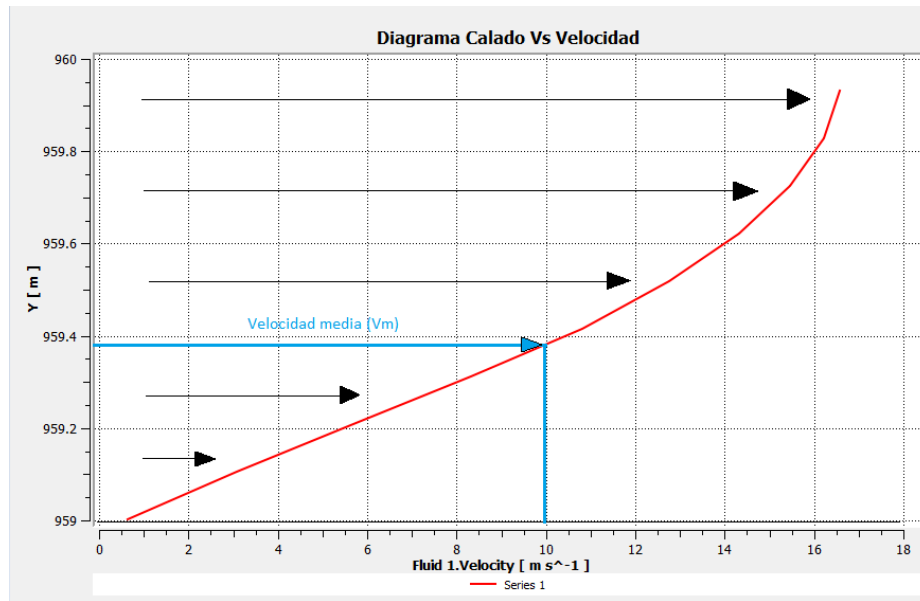


Nota. Se toma datos en la sección de interés. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Mediante la herramienta “Chart” se determinó el perfil de velocidades de la rápida escalonada con flujo rasante, y se obtuvo una velocidad media de $V_m = 10.00\text{m/s}$ a la salida.

Figura 92.

Perfil de velocidades en toda la rápida escalonada.



Nota. Se muestra el diagrama de velocidad vs el calado en la sección de interés. Elaborado por:
Los autores a través de Ansys CFX

En la tabla 26, se observa que la velocidad media a la salida de la rápida es 10.00m/s y su respectivo calado es de 0.93m , en relación al primer modelo se nota claramente que la velocidad ha bajado.

Tabla 26.

Resultados al fondo de la rápida escalonada con flujo rasante

Cota fondo rápida escalonada		959.00	
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad a la salida	Vm	10.00	m/s
Calado	Y	0.65	m

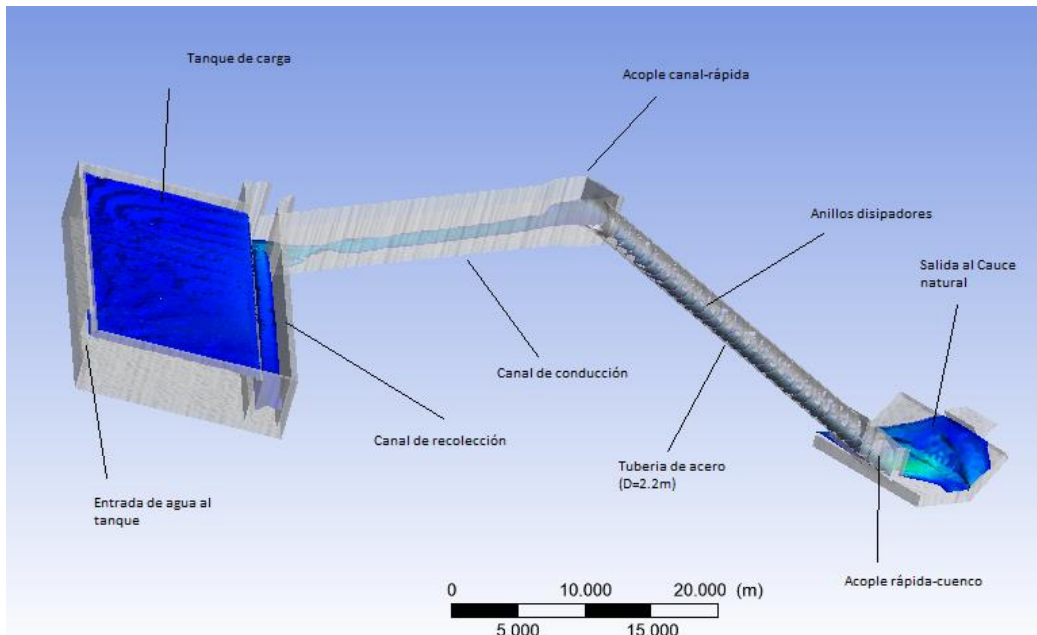
Nota: Datos tomados a través del modelado en Ansys CFX. Elaborado por: Los autores

7.6.6. Modelación de la rápida con anillos disipadores

La segunda alternativa de diseño para dar una solución viable al problema en el presente proyecto de titulación es la rápida circular con anillos disipadores de energía, descrito en capítulos anteriores, para ello se ha introducido en Ansys, anillos con rugosidad absoluta del acero con un espaciado uniforme.

Figura 93.

Modelo 3D de la rápida con anillos disipadores.



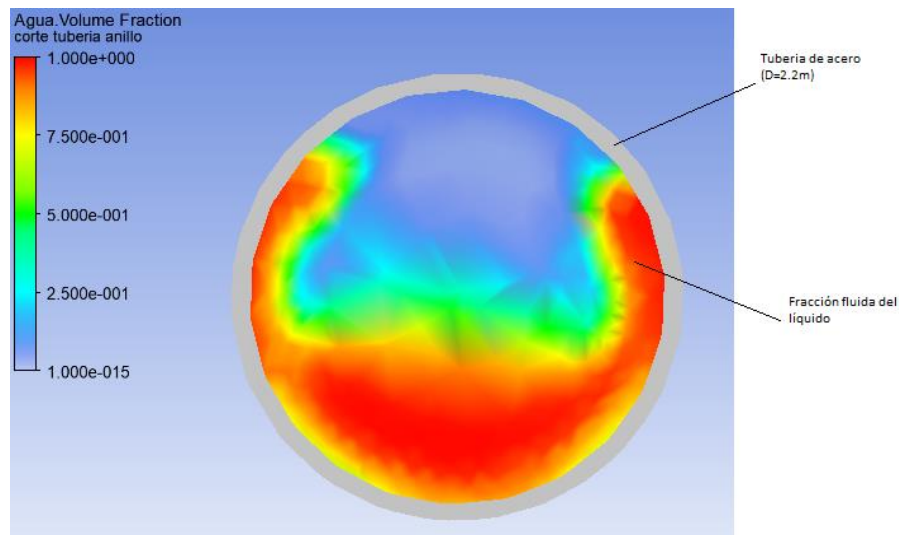
Nota. Se observa todas las obras hidráulicas que intervienen en la rápida con anillos disipadores.

Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

A continuación, se presenta el corte transversal en la rápida, en el anillo disipador #3, cabe mencionar que se puede apreciar como cumple el concepto teórico en el que el agua choca con el anillo, se eleva por el contorno del anillo y pasa al siguiente elemento, de esta manera se va disipando la energía con la que llega, hasta aguas abajo.

Figura 94.

Corte frontal de la rápida anillada.



Nota. Se observa la fracción fluida de líquido en la tubería con anillos disipadores. Elaborado por:

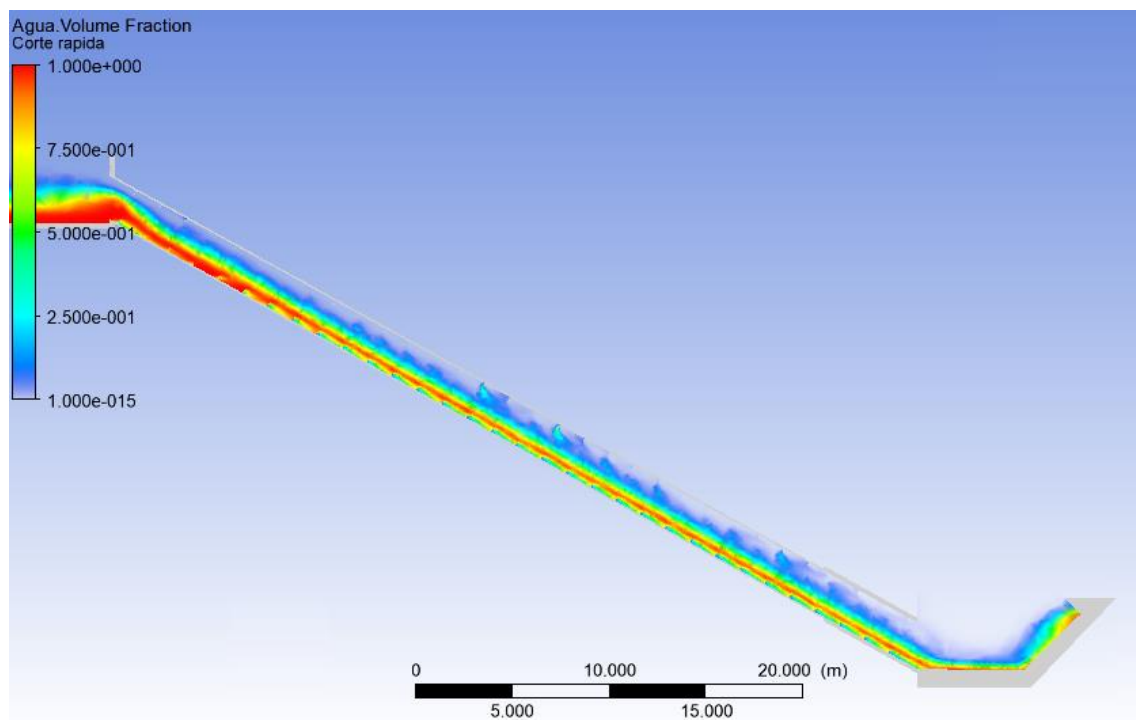
Los autores a través de Ansys CFX

En la figura 95, se realizó un corte longitudinal a lo largo de la rápida con anillos disipadores mostrando la fracción fluida.

El gráfico del modelo numérico cumple con el concepto teórico, por lo consiguiente, los elementos disipadores obligan que el fluido choque con los anillos, en consecuencia, la velocidad se reduce.

Figura 95.

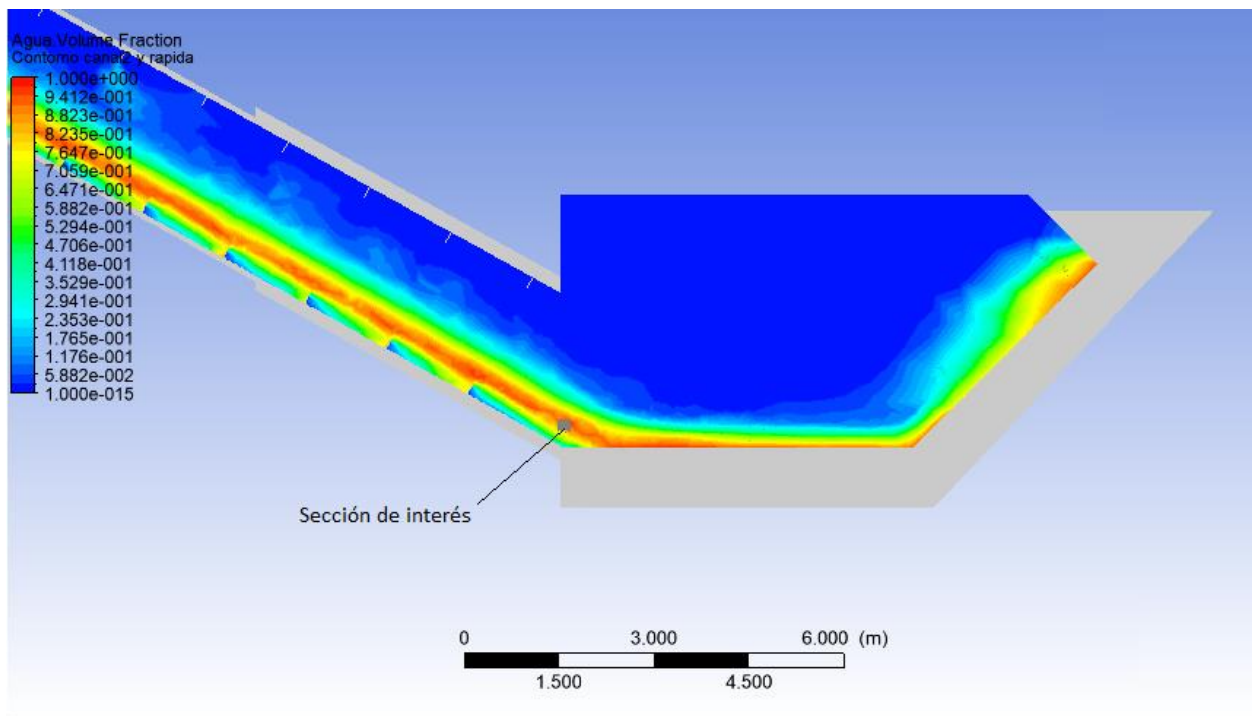
Corte longitudinal rápida con anillos disipadores.



Nota. Se observa el corte de la fracción fluida en la rápida anillada. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Figura 96.

Corte longitudinal rápida con anillos disipadores a la salida.

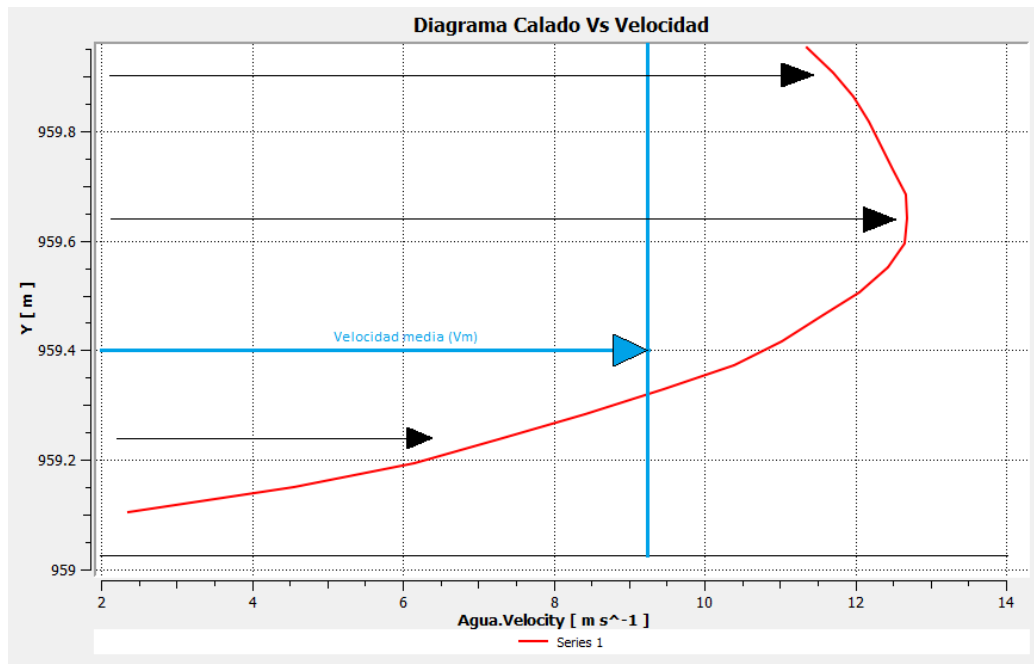


Nota. Se toma datos en la sección de interés. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Mediante la herramienta “*Chart*” se determinó el perfil de velocidades de la rápida con anillos disipadores, y se obtuvo una velocidad media de $V_m = 9.25 \text{ m/s}$ a la salida.

Figura 97.

Perfil de velocidades rápida anillos disipadores a la salida.



Nota. Se muestra el diagrama de velocidad vs el calado en la sección de interés. Elaborado por: Los autores a través de Ansys CFX

Tabla 27.

Resultados al fondo de la rápida con elementos disipadores

Cota fondo rápida escalonada		959.04	
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad a la salida	Vm	9.25	m/s
Calado	Y	0.85	m

Nota: Datos tomados a través del modelado en Ansys CFX. Elaborado por: Los autores

En la tabla 27, se observa que la velocidad media de la rápida con anillos disipadores es de 9.25 m/s y su respectivo calado es de 0.85 m, en relación a la rápida lisa se nota claramente que la velocidad ha disminuido para el modelo numerico analizado en esta sección.

7.6.7. Comparación de los resultados del diseño analítico con el modelo numérico.

A continuación, se detallan los valores obtenidos de los diagramas que arrojo Ansys CFX para el cálculo analítico y el modelo numérico para un flujo bifásico.

7.6.7.1. Vertedero de excesos del tanque de carga

En la tabla 28, se visualiza la energía total del vertedero, la cual varía en 0.02m, y la velocidad de acercamiento en 0.03 m/s.

Tabla 28.

Resultados comparativos del vertedero del tanque de carga

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Energía total del vertedero	E	3.78	3.81	m
Velocidad de acercamiento	Vo	0.12	0.09	m/s

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

7.6.7.2. Canal de recolección

En la tabla 29, se visualiza que la velocidad media varía en 0.098m/s, y 0.02m en el calado, estos valores se determinaron en la sección de control para ambos modelos.

Tabla 29.

Resultados comparativos del canal de recolección.

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Velocidad media	Vm	4.088	3.99	m/s
Calado	Y	1.60	1.62	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

7.6.7.3. Salto negativo

En la tabla 30, se analizó el salto que ocurre entre el canal de recolección y el canal de conducción, obteniendo una variación de energía específica entre ambos modelos de 0.526 m, y sus respectivas conjugadas del 10-20%.

Tabla 30.

Resultados comparativos del salto negativo

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Energía específica	E_o	3.884	4.41	m
Profundidad contraída	h_1	0.648	0.77	m
Segunda conjugada	h_2	2.208	2.98	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

En la tabla 31, se visualiza la profundidad externa e interna, del modelo numérico y del diseño analítico y su respectiva diferencia de sobre elevación.

Tabla 31.

Resultados comparativos de la sobre elevación

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Profundidad externa	y_1	1.357	1.22	m
Profundidad interna	y_2	0.383	0.342	m
Sobre elevación	Δh	0.974	0.44	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

7.6.7.4. Canal de conducción de excesos

En la tabla 32, se visualiza la velocidad media y el calado, entre el 10-15% de variación en los métodos analizados en esta sección.

Tabla 32.*Resultados comparativos del canal de conducción de excesos.*

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Velocidad media	Vm	3.425	4.1	m/s
Calado	Y	1.900	1.77	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

7.6.7.5. *Rápidas de descarga*

En la tabla 33, se determinó los parámetros de velocidad media y calado para un flujo bifásico. El modelo numérico tiene valores de: 17.60 m/s y 0.78 m, en cambio el diseño analítico 17.45 m/s y Y= 0.75 m respectivamente.

Tabla 33.*Resultados comparativos de la rápida con tubo liso*

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Velocidad media	Vm	17.60	17.45	m/s
Calado	Y	0.78	0.75	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

En la tabla 34, se visualiza que la velocidad media varía en 0.42 m/s, y su calado en 0.08m, entre ambos métodos.

Tabla 34.*Resultados comparativos de la rápida escalonada.*

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Velocidad media	Vm	10.00	10.42	m/s
Calado	Y	0.65	0.57	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

En la tabla 35, se determinó los parámetros para ambos métodos a la salida de la rápida anillada, con una diferencia mínima entre 5-10% para la velocidad media y el calado, con flujo agua-aire.

Tabla 35.

Resultados comparativos de la rápida con anillos disipadores.

Descripción	Símbolo	Numérico	Analítico	Unidad
Velocidad media	Vm	9.25	9.96	m/s
Calado	Y	0.85	0.83	m

Nota: Se describe los parámetros con valores, unidades y símbolos. Elaborado por: Los autores

CAPÍTULO VIII

EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.

8.1. Aspectos importantes del diseño hidráulico de las alternativas.

Luego de haber realizado la respectiva evaluación de las obras de excesos de la central hidroeléctrica existentes como el tanque de carga, vertedero de excesos, canal de transición y la rápida lisa circular de acero, además del diseño de una rápida escalonada de hormigón armado y de una rápida de acero con anillos como posibles alternativas para mejorar la capacidad de disipación de energía de la obra de descarga, se puede observar algunos aspectos que durante la realización del proyecto se han encontrado de suma importancia para cumplir los objetivos del mismo. En este apartado se presenta los aspectos más importantes tanto del diseño analítico y del modelo numérico. Refiriendo al diseño analítico como el uso de las expresiones y formulas tradicionales de la hidráulica para ejecutar el respectivo análisis.

8.1.1. Aspectos importantes de la comprobación y diseño analítico. -

Para el diseño analítico se evaluó por medio de las diversas ecuaciones mencionadas en el capítulo 3, se realizó los cálculos matemáticos por medio del programa Microsoft Excel. Cabe recalcar que este método nos brinda soluciones cercanas a la realidad generalmente basadas en expresiones derivadas de la experimentación física.

A continuación, se detalla los aspectos importantes visualizados en los resultados del modelo analítico.

- a) La velocidad media de flujo con la que llega el caudal al inicio de la rápida escalonada, que se podría denominar velocidad de acercamiento, corresponde al flujo gradualmente variado y es 6.45 m/s, sin embargo, mediante el análisis del canal de conducción se resuelve que el resalto se rechaza, llegado a colisionar con las paredes del acople al ingreso de la rápida,

generando que las corrientes de flujo al colisionar con la pared se muevan en dirección contraria, contrarrestando el sentido del flujo, esto causa reducción en la velocidad de agua al ingreso de la rápida, esta velocidad se asumió cercana a la crítica dado la imposibilidad de calcularla en base a la formulación hidráulica tradicional y le corresponde un valor de 4.10 m/s.

- b) La geometría de la rápida para todos los casos analizados tiene una pendiente fuerte de 55.88 %, la velocidad en la rápida aumenta considerablemente con la altura vencida y se presenta el fenómeno de introducción de aire, el mismo que ocasiona turbulencia al interior del flujo.
- c) Una de las alternativas propuestas y evaluadas es la rápida escalonada de hormigón armado, para el diseño de la misma se optó por conservar el ancho mayor de la transición al inicio de la rápida, al realizar el análisis se comprobó que al aumentar el ancho del canal, la velocidad al final de la rápida disminuye, y a su vez aumenta la disipación de energía con respecto a la obra de excesos existente, logrando disipar la energía a la salida en un 62.86%, y disminuyendo la velocidad media a 10.42 m/s.
- d) Otra de las alternativas propuestas y evaluadas es la rápida lisa de acero con anillos disipadores, para el diseño de la misma se partió del diámetro de la tubería existente con la inclusión de anillos disipadores de acero, el efecto ocasionado es disminuir la velocidad de flujo al chocar contra dichos anillos y a su vez aumentar la disipación de energía gracias a la turbulencia e introducción de aire que ocurre al interior del flujo, logrando disminuir la velocidad a 9.96 m/s y disipar la energía en 77 %. Esta velocidad resulta ser mucho menor que la velocidad en la rápida lisa circular e incluso un poco menor a la velocidad de flujo a la salida de la rápida escalonada. Dado que las expresiones usadas en el diseño obedecen

a experimentación física con pendientes menores a la planteada, se corroboró los resultados mediante la ejecución de la modelación numérica

8.1.2. Aspectos importantes de la modelación numérica.-

Para el análisis de dinámica de fluidos computacional de todas las obras hidráulicas que intervienen en el desalajo de los excesos del tanque de carga, se utilizó el software Ansys v19.0, visualizando de manera más práctica el desarrollo del flujo a lo largo de todos los elementos hidráulicos, para lo cual se obtuvo los siguientes aspectos importantes:

- a) Al modelar la curva que se encuentra a la salida del canal de recolección e inicio del canal de conducción, los resultados indican la presencia de un resalto hidráulico propiciado por el salto negativo y la geometría compleja del canal de lavado del tanque de carga, no es propiamente una curva que presenta sobreelevación.
- b) Una de las alternativas que se modelo fue la rápida escalonada. La máxima elevación del flujo bifásico fue alrededor de 1.70 m, obteniéndose una disipación de energía del 77.53%, mayor en comparación con la rápida de tubo liso.
- c) Otra de las propuestas analizadas es la rápida con anillos disipadores en la que se diseñaron 32 anillos, siendo la más favorable en comparación con los modelos anteriores llegando a tener una disipación del 79.63%, obteniendo el 2.09% más de disipación con respecto a la escalonada y de 44.38% con relación a rápida de tubo liso.

8.2. Comparación y validación de las alternativas. -

Una vez evaluadas las obras de excesos existentes de la central hidroeléctrica Palmira-Nanegal, se ha confirmado que la rápida circular lisa no representa un diseño óptimo para una obra de descarga con las solicitudes actuales, y por ello se ha planteado dos alternativas como son la

rápida escalonada y la rápida con anillos disipadores, a continuación, se comparan las dos alternativas propuestas.

8.2.1. Eficiencia de disipación en alternativas del diseño analítico.

Las alternativas del diseño analítico del presente estudio son obtenidas por medio de parámetros hidráulicos. Dentro de las características más importantes se encuentra la velocidad media de flujo a la salida de la rápida (V), adicional, se comparó con varios aspectos, que corresponden a cada una de las alternativas, como por ejemplo el porcentaje de disipación. Para el efecto se idealiza que el caudal que ingresa a la rápida es constante para las 2 alternativas, y su valor es 13 m³/s.

Se presenta un cuadro de resumen de las velocidades de la rápida lisa existente y de las alternativas planteadas.

Tabla 36.

Tabla de velocidades del diseño analítico.

Velocidad (v)	Rápida Circular Lisa	Rápida Escalonada	Rápida con anillos
	m/s	m/s	m/s
con aireación	17.45	10,42	9,96

Nota: En la tabla se describe los datos y parámetros de la velocidad con valores, símbolos y números. Elaborado por: Los autores.

En los resultados, se consideró la introducción de aire para la determinación de la velocidad a la salida de la rápida. En resumen, la rápida escalonada tiene una velocidad de diseño a la salida de 10.42 m/s y la rápida con anillos una velocidad a la salida de 9.96 m/s, se afirma que la velocidad de salida de ambas rápidas es menor que en la rápida existente.

A continuación, se muestra el cuadro de porcentajes de disipación respectivo para cada alternativa.

Tabla 37.

Tabla de disipación del diseño analítico.

Alternativas	Rápida Circular Lisa	Rápida Escalonada	Rápida con anillos
	%	%	%
Porcentaje de disipación	36.41	62.86	77.00

Nota: En la tabla se describe los datos y parámetros de la velocidad con valores, símbolos y números. Elaborado por: Los autores.

Se puede observar que el porcentaje de disipación en la rápida con anillos es mayor a la rápida escalonada, por ende, se afirma a menor velocidad de flujo a la salida de la rápida, mayor capacidad de disipación en la misma.

8.2.2. Eficiencia de disipación en alternativas de los modelos numéricos

Tabla 38.

Resultados de los tres modelos numéricos

CUADRO COMPARATIVO DE VALORES OBTENIDO DEL LOS MODELOS NÚMERICOS EN ANSYS CFX						
DESCRIPCIÓN	Caudal	Velocidad media	Calado	Energía inicial	Disipación de energía	
	m ³ /s	m/s	m	m	m	%
Rápida circular lisa	13.00	17.45	0.78	25.58	9.02	35.25
Rápida escalonada	13.00	10.00	0.65	25.58	19.83	77.53
Rápida con anillos disipadores	13.00	9.25	0.85	25.58	20.37	79.63

Nota: En la tabla se describe los datos y parámetros del resalto con valores, símbolos y números.

Elaborado por: Los autores

En la tabla 38. Se comparó todos los valores obtenidos de los diagramas de velocidades anteriormente descritos para cada uno de los 3 modelos numéricos con introducción de aire, y como resultado se determinó que la rápida con anillos disipadores tiene la velocidad media más baja con 9.25m/s y un calado de 0.85m.

8.3. Selección de la alternativa óptima desde el punto de vista técnico-económico.

Luego de haber analizado las alternativas desde el punto de vista técnico, a continuación, se realiza la evaluación desde el punto de vista económico.

Desde el punto de vista económico, indiscutiblemente se decidió optar por la alternativa de la rápida con anillos disipadores, como principal motivo, la utilización de la tubería de acero de la rápida lisa existente, al conservar esta tubería se tendrá una cantidad significativa de ahorro en el aspecto económico, los gastos se centrarán en el montaje de los anillos de acero dentro de la tubería. En este apartado también se consideró el tiempo de duración, porque la colocación de los anillos influye directamente en el ahorro de la mano de obra, primero se necesitará menos personal para su elaboración, y segundo, se necesita menos días de remuneración, por su rápida construcción

Y finalmente cabe mencionar que la obra de descarga no está en constante funcionamiento, es decir se utiliza cada determinado tiempo en caso de emergencia o cuando el sistema principal de la central hidroeléctrica necesita mantenimiento. Por ello podemos decir que se justifica el ahorro obtenido al escoger la rápida con anillos y podemos concluir que la rápida con anillos disipadores es la alternativa óptima desde el punto de vista técnico-económico.

8.3.1. Presupuesto de la rápida escalonada.

Tabla 39.

Presupuesto referencial para la elaboración de la rápida escalonada.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN DEL RUBRO	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO (USD)	COSTO TOTAL (USD)
1.00	OBRAS PRELIMINARES				
1.01	Replanteo Y Nivelación Con Equipo Topográfico	133.70	m2	1.69	225.95
1.02	Desbroce y limpieza a máquina	133.70	m2	9.83	1314.27
1.03	Desalojo de capa vegetal h=30cm a sitio autorizado por el municipio	40.11	m3	9.83	394.28
1.04	Cerramiento Provisional H=2.4 M Con Lona Verde Y Pingos	109.10	m	6.91	753.88
					2688.39
2.00	DESARMADOS, DERROCAMIENTOS Y DESALOJOS				
2.01	Desmontaje de tubería existente D=2.2m	47.75	m	88.89	4244.50
2.02	Desalojo De Material Con Volqueta (Transporte 10 Km) Cargada Manual ,	78.31	m3	10.83	848.10
					5092.59
3.00	MOVIMIENTO DE TIERRAS				
3.01	Relleno con sub base clase 3 mejoramiento	7.16	m3	24.56	175.91
3.02	Geo membrana de polietileno HDPE, e=0,75mm	105.05	m2	9.07	952.80
					1128.71
4.00	CIMENTOS Y ESTRUCTURA				
4.01	Replanteo de hormigón f'c = 180 Kg/cm2	1.43	m3	120.87	173.15
4.02	Hormigón en muros laterales f'c=280 Kg/cm2 (Incluye encofrado)	108.87	m3	157.87	17187.31
4.03	Acero de refuerzo fy = 4200 Kg/cm2	8546.30	kg	1.67	14272.31
					31632.77
5.00	PISOS RAPIDA ESCALONADA				
5.01	Lustrado sub base clase 2; e= 15cm(incluye hidratación y compactado)	15.76	m3	24.56	387.00
5.02	Hormigón para gradas f'c=280Kg/cm2 e= 30cm (incluye encofrado)	42.29	m3	138.31	5849.52
5.03	Acero de refuerzo para chicotes fy = 4200 Kg/cm2	830.00	Kg	1.67	1386.09
					7622.62
				SUBTOTAL	48 165.08
				VALOR X M DISP.	2995.34

Nota. La tabla describe los rubros, cantidades, costos unitarios y valores totales por metro de disipación. Elaborado por: Los autores.

8.3.2. Presupuesto de la rápida con anillos

Tabla 40.

Presupuesto referencia para la implantación de los anillos disipadores.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN DEL RUBRO	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO (USD)	COSTO TOTAL (USD)
1.00	OBRAS PRELIMINARES				
1.01	Replanteo Y Nivelación Con Equipo Topográfico	133.7	m2	1.69	225.953
1.02	Cerramiento Provis. H=2.4 M Con Lona Verde Y Pingos	133.7	m	9.83	1314.271
1.03	Limpieza y preparación de la superficie a intervenir	47.75	m	1.34	63.985
1.04	Sobreacarreo (trasporte/medios mecánicos)	47.75	m	10.04	479.41
					2083.619
5.00	ACUEDUCTO DE ACERO				
5.01	Acero de refuerzo fy = 4200 Kg/cm2	44.18	Kg	1.67	73.7806
5.02	Suministro e Instalación de anillos de acero e=0.02m según diseño	32.00	u	492.33	15754.56
					15828.3406
				SUBTOTAL	17 911.96
				VALOR X M DISP.	909.42

Nota. La tabla describe los rubros, cantidades, costos unitarios y valores totales por metro de disipación. Elaborado por: Los autores.

CONCLUSIONES

Se concluye que la modelación numérica con ANSYS CFX tiene ventajas sobre las metodologías analíticas en ciertas condiciones, como por ejemplo en la caída del flujo hacia el canal de recolección nos permite modelar el fenómeno en 3 dimensiones mientras que analíticamente no se puede. Sin embargo, en el diseño analítico se puede tener aproximación a los resultados sin necesidad de incluir el costo computacional y el manejo del programa.

En el presente documento se realizó un presupuesto referencial de las diferentes propuestas a la solución de la problemática, en primera instancia la alternativa de implantación de la rápida escalonada es de 2995.34 dólares por metro de disipación de energía, en cambio la alternativa al incorporar anillos disipadores al tubo actual es de 909.42 dólares por metro de disipación de energía siendo la más viable para el proyecto.

Durante la selección de la alternativa óptima, se concluye que además de comparar el aspecto técnico y el aspecto económico, es de suma importancia el factor tiempo, debido a que ambos puntos de vista dependen directamente del él.

Se concluye que en la modelación numérica en ANSYS CFX, se obtuvo resultados esperados y cercanos al diseño analítico.

Se concluye que los resultados finales de la velocidad media de flujo de la rápida circular lisa no se encuentran dentro de los límites permisibles de velocidad, sin embargo, la velocidad media de las alternativas se encuentra cercana o menor al límite permisible de 10 m/s, por lo tanto,

la aproximación de las alternativas es acertada, admisible y cumple con el objetivo optimización de las obras de excesos.

Del diseño de la rápida con anillos se concluye que el método de cálculo propuesto por la HEC14 para el diseño de los anillos en tuberías de acero es el método más acertado, pese a que han sido probados en pendientes menores a la de la rápida analizada, los resultados obtenidos tanto del método analítico como el modelo numérico fueron similares.

Una vez analizado los modelos matemáticos en Ansys CFX, la velocidad media de la rápida con tubería circular de fondo liso, rápida escalonada con flujo rasante y rápida circular con anillos disipadores de acero, son 17.60; 10.0; 9.25 [m/s] respectivamente, se llegó a la conclusión que la rápida con elementos disipadores es la más conveniente y cumpliría el criterio de 10 m/s como velocidad permisible para tuberías de acero.

En el análisis técnico-económico de las alternativas de diseño para la solución del problema se determinó que la alternativa más viable para los intereses económicos de la CEM, es la rápida circular con anillos, con un costo menor de 50% en comparación a la rápida escalonada, esta disminución de costo se debe a la reutilización de la tubería, por ende, no requerirá el rubro de instalación de tubería. Además, presenta una mayor eficiencia de disipación de energía.

Se concluye que existe similitud en los resultados entre el diseño analítico y el modelo numérico, cuyo rango de error se encuentra entre 5-10 %.

RECOMENDACIONES

Se recomienda utilizar la metodología de diseño del HEC14 para diseños de rápidas con anillos ya que resultó ser eficiente y práctico al momento de obtener resultados confiables de disipación de energía.

Se recomienda utilizar modelación física y/o numérica para estructuras atípicas que no pueden ser resueltas por la hidráulica convencional.

Se recomienda no usar los cálculos del flujo espacialmente variado en canales de recolección, cuando la altura de caída del agua es considerable.

Se recomienda realizar directamente el modelado de la geometría en Ansys, ya que, el mismo permite importar archivos de diferentes paquetes computacionales, para evitar, generar de manera inadecuada los dominios, el mallado y complicar posteriores cálculos, al realizarlos en otro software.

A pesar de que la descarga por las rápidas propuestas se puede construir directamente, sobre la quebrada podría existir problemas de erosión al pie de la rápida, por lo que se recomienda instalar un enrocado de 0.6 m de diámetro protegiendo la zona de descarga sobre el cauce.

REFERENCIAS

- Casa, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Programada en Flow 3D*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Chamani, M. y R, Rajaratnam, N. (1999). *Characteristics of skimming Flow Over Stepped Spillways*. Journal of Hydraulics Engineering.
- Chanson, H (2015), *Energy Dissipation in Hydraulic Structures*. The international Association for Hydro-Environments Engineering and Research (IAHR).
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. University of Illinois
- Connor, N. (2019). *Ecuaciones de Navier – Stokes*. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-navier-stokes-definicion/>.
- Fernández Oro J. M (2012). *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos*. Barcelona. Reverté.
- Guevara, M. (2013), *Socavación en Puentes*. Editorial: Lemoine Editores y Editorial Universidad del Cauca.
- Hernández, I., Ibañez, M. y Salazar J. (2019). *Mecánica e fluidos con ejercicios CFD*. Universidad Autónoma del Estado de México. Consultado el 10 de noviembre de 2020. http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/99151/Mecanica_de_fluidos.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- <https://www.pichincha.gob.ec/gestion/infraestructura/152-hidroelectrica-palmira-nanegal>.
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*. Department of Civil and Environmental Engineering Georgia Institute of Technology Atlanta.

- Krochin, S. (1986). *Diseño Hidráulico tercera edición*. Editorial de la Escuela Politécnica Nacional.
- Ladino, E., Santos, G. y García, C. Simulación numérica CFD de la estructura de control y del sistema de compuertas radiales - represa El Quimbo. *Tecnura*, 22(58), 65-78.
<https://doi.org/10.14483/22487638.14296>.
- López, A. (2015). *Resolución numérica de las ecuaciones de navier-stokes* [Tesis de grado, Universidad de Cantabria]. Archivo digital.
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7798/Adriana%20Cavada%20Lopez-Tapia.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- Maldonado, J. (s/f). *Maestría en métodos matemáticos y simulación numérica en ingeniería* [Tesis de posgrado, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15478/1/UPS-CT007605.pdf>
- Murad, K. (2017). *Estudio del desempeño hidráulico del canal multipropósito del laboratorio de hidráulica y dinámica de fluidos lh&df del campus balzay* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28546/1/Tesis.pdf>
- Prefectura de pichincha (2017, 22 de diciembre). *Hidroeléctrica Palmira-Nanegal*. Prefectura de pichincha. Consultado el 21 de septiembre de 2021.
- Publication No. FHWA-NHI-06-086 July 2006 “Hydraulic Engineering Circular No. 14” Third Edition, Cap 7.1.2
- Rodríguez, F. (2016). *Modelación numérica del flujo en un descargador a vórtice aplicando mecánica de fluidos computacional (CFD)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Rodríguez, P. (2008). *Hidráulica de canales*. Juárez, México.

https://www.academia.edu/25000821/Hidr%C3%A1ulica_de_Canales_-_Pedro_Rodr%C3%ADguez_Ruiz.

Shames, I. (2005). *Mecánica de Fluidos*. Santa Fe de Bogotá, Colombia. Editorial. McGraw HILL.

Sotelo, G. (1997) *Hidráulica General Volumen 1*. Editorial Limusa. S.A. de C.V. grupo noriega editores.

Steerter, V. (2000). *Mecánica de fluidos, Novena edición*. Santa Fé de Bogotá, Colombia. Editorial: Mc-Hill Interamericana, S. A, Avenida de las Américas 46n41.