

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**DISEÑO Y VERIFICACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO DE REDES DE
ALCANTARILLADO CON LA AYUDA DE SOFTWARE LIBRE Y
PROGRAMACIÓN**

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN COMPUTACIONAL BÁSICA
PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE DISIPACIÓN
DE ENERGÍA EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADO**

**TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

DANIEL ANDRÉS CAMPAÑA ERAZO

daniel.campana@epn.edu.ec

DIRECTOR: M.Sc. ING. LUIS ENRIQUE RÍOS CANDO

luis.rios@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, DANIEL ANDRÉS CAMPAÑA ERAZO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

DANIEL ANDRÉS CAMPAÑA ERAZO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DANIEL ANDRÉS CAMPAÑA ERAZO, bajo mi supervisión.

M.Sc. ING. LUIS ENRIQUE RÍOS CANDO
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) productos(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DANIEL ANDRES CAMPAÑA ERAZO

M.Sc. ING. LUIS ENRIQUE RÍOS CANDO

DEDICATORIA

A L a P, por haber sido incondicional durante toda su vida y haber estado junto a mí hasta en los peores momentos, fuiste un ser inigualable que jamás voy a olvidar y tu recuerdo vivirá en mí para siempre.

A S a MS, por creer en mí y apoyarme incondicionalmente, por valorar mi esfuerzo y dedicación, por darme una razón para mejorar cada día y por todo lo que haces por mí.

A Salvador y Josefina, que solo siendo ustedes mismos me enseñaron a que lo más importante que puede tener una persona en la vida es el honor y el respeto, valores que no se regalan, sino que se ganan con esfuerzo y trabajo día tras día.

Mis respetos hacia ustedes.

AGRADECIMIENTO

A todas las personas que en mi vida académica han compartido conmigo lecciones y consejos que me ayudaron a crecer a nivel personal y profesional les extiendo mi más sincero agradecimiento.

A mi madre Teresa, por enseñarme que el sacrificio, esfuerzo y perseverancia dan sus frutos tarde o temprano.

A mi hermano Diego, por enseñarme que a los amigos se los mantiene cerca y a los enemigos aún más cerca.

A mi amigo Cristian, por enseñarme que una mala persona nunca podrá ser un buen profesional.

A mi abuelita Liria, por enseñarme que una carrera no es lo más importante en la vida, pero ayuda.

A mi padre Widman, por enseñarme que una buena guía no está en las personas que aconsejan sino en las que predicán con el ejemplo.

Al ingeniero Ríos, por enseñarme que la capacidad intelectual está por encima de favores personales.

A mi universidad, por enseñarme que la educación no es adoctrinamiento sino una fuente de conocimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
Clasificación de los disipadores de energía	3
1.5 Estado del arte	27
2 METODOLOGÍA.....	28
2.1 Revisión bibliográfica	29
2.2 Lógica de programación	29
Ingreso de datos.....	29
Desarrollo de los cálculos	30
Resultados.....	30
2.3 Desarrollo del código en R y RMarkdown	31
Datos preliminares	31
Datos de entrada.....	32
Memorias de cálculo	32
2.4 Ejercicios de aplicación	34
Escenario A	35
Escenario B	35
Escenario C.....	36
2.5 Manual de usuario	37
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	38
3.1 Resultados.....	38
Revisión de las referencias bibliográficas.....	38
Aplicación desarrollada	38

Ejercicios de aplicación	41
Manual de usuario	52
3.2 Conclusiones	54
Acerca de la revisión bibliográfica	54
Acerca del lenguaje de programación	54
Acerca de la lógica de programación	54
Acerca de las memorias de cálculo	54
3.3 Recomendaciones	56
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
5 ANEXOS	59
Anexo I. Memorias de cálculo	60
Anexo II. Manual de usuario	143
Anexo III. Diagramas de flujo	150
Anexo IV. Ecuaciones para el cálculo de los disipadores	151
Anexo V. Herramientas básicas de RMarkdown	156
Anexo VI. Misceláneos de R, RStudio y RMarkdown.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de los disipadores de energía.....	3
Figura 1.2. Esquema del disipador con pozo de salto	4
Figura 1.3. Choque del flujo dentro del pozo de salto.....	6
Figura 1.4. Coeficiente de pérdida de carga función del parámetro de caída	7
Figura 1.5. Esquema de disipadores con estanque amortiguador	8
Figura 1.6. Esquema del disipador con viga de impacto	14
Figura 1.7. Ancho del disipador tipo viga de impacto.....	15
Figura 1.8. Tipos de flujo en una rápida con fondo escalonado	17
Figura 1.9. Zonas de flujo en la rápida escalonada	18
Figura 1.10. Dimensiones de las bandejas.....	25
Figura 2.1. Diagrama de la metodología aplicada	28
Figura 2.2. Lógica de programación	29
Figura 2.3. Estructura predeterminada del encabezado YAML.....	31
Figura 2.4. Fragmento de código predeterminado - Chunk 1: setup.....	31
Figura 2.5. Estructura de las memorias de cálculo	32
Figura 2.6. Estructura general de los fragmentos de código (chunks)	33
Figura 3.1. Vista en elevación del pozo de salto	42
Figura 3.2. Esquema en elevación del disipador con viga de impacto.....	43
Figura 3.3. Vista en elevación del estanque amortiguador	46
Figura 3.4. Relación de aspecto de los escalones de la rápida	47
Figura 3.5. Vista en elevación de la cámara de entrada del descargador a vórtice	50
Figura 3.6. Esquema de la vista en elevación del pozo de bandejas.....	51
Figura 5.1. Límites del flujo FRAS (varios autores)	152
Figura 5.2. Límites del flujo FEXE (varios autores).....	153
Figura 5.3. Límites del flujo en una rápida con fondo escalonado	153
Figura 5.4. Dimensiones de la cámara de entrada tipo caracol	154
Figura 5.5. Dimensiones en planta de la cámara de entrada.....	154
Figura 5.6. Ábaco de diseño para pozo de bandejas.....	155

Figura 5.7. Nuevo documento RMarkdown	157
Figura 5.8. Encabezado YAML.....	157
Figura 5.9. Espacio para código R (Chunk).....	159
Figura 5.10. Conversión de archivos Rmd a Pdf	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de estanque amortiguador según el número de Froude.....	9
Tabla 1.2. Constantes de dimensionamiento (K) para pozo de bandejas.....	25
Tabla 1.3. Dimensiones mínimas para pozo de bandejas	25
Tabla 1.4. Documentos técnicos de consulta.....	27
Tabla 2.1. Escenarios según el tipo de dissipador	35
Tabla 2.2. Datos de entrada - Escenario “A”	35
Tabla 2.3. Datos de entrada - Escenario “B”	36
Tabla 2.4. Datos de entrada - Escenario “C”	36
Tabla 3.1. Listado de archivos de la aplicación desarrollada	39
Tabla 3.2. Configuración de memorias de cálculo por número de línea de código..	40
Tabla 3.3. Hidrodinámica del flujo de aproximación - Escenario “A”	41
Tabla 3.4. Dimensiones del pozo de salto.....	42
Tabla 3.5. Dimensiones de la viga de impacto.....	43
Tabla 3.6. Matriz comparativa - Escenario “A”	44
Tabla 3.7. Dimensionamiento del estanque amortiguador	45
Tabla 3.8. Matriz comparativa - Escenario “B”	48
Tabla 3.9. Hidrodinámica del flujo de aproximación - Escenario “C”	49
Tabla 3.10. Valores calculados de la cámara de entrada	49
Tabla 3.11. Valores calculados del pozo de bandejas	50
Tabla 3.12. Matriz comparativa - Escenario “C”	52
Tabla 3.13. Programas y paquetes computacionales utilizados	53
Tabla 5.1. Parámetros editables del encabezado YAML	158
Tabla 5.2. Opciones de ejecución de los fragmentos de código.....	159
Tabla 5.3. Atajos de funciones en RMarkdown	161
Tabla 5.4. Comandos útiles en RMarkdown.....	161

RESUMEN

La construcción de estructuras disipadoras de energía es común en sistemas de alcantarillado, por lo que es necesario contar con una herramienta que permitan analizar y dimensionar estas estructuras especiales.

El presente trabajo de titulación plantea el desarrollo de una aplicación computacional básica para la elaboración de memorias de cálculo de varios disipadores de energía hidráulica.

La aplicación se desarrolló con el lenguaje de programación R y el paquete computacional RMarkdown. Estas herramientas permiten trabajar con texto plano y líneas de código en un solo archivo y generar informes técnicos mediante el procesamiento de la información y la compilación los resultados en un documento final.

La aplicación DDissipator v1.0 utiliza las ecuaciones de la Hidráulica Básica para procesar los datos de entrada, determina las características hidrodinámicas del flujo y genera una memoria de cálculo con las características del disipador de energía.

PALABRAS CLAVE: Disipadores de energía hidráulica, entorno de desarrollo RStudio, programación con R, desarrollo de aplicaciones computacionales, reportes técnicos con RMarkdown.

ABSTRACT

The construction of energy dissipation structures in sewer systems, so it is necessary to have tools that allow analysis and sizing of these special structures.

This work proposes the development of a basic computational application for the elaboration of technical documents of several hydraulic energy dissipators.

The application was developed using R programming language and the RMarkdown software package. These tools allow to work with plain text and code lines in a single file and generate technical reports by processing the information and compiling the results in a final document.

The DDissipation v1.0 application uses the equations of Basic Hydraulic to process the input data, determines the characteristics of the flow and generates a technical document with the characteristics of energy dissipator.

KEYWORDS: Energy dissipators, RStudio development environment, R programming, development of computational applications, technical reports with RMarkdown.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Los sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario se diseñan para trabajar en condiciones que no desgasten la conducción antes de tiempo. Al diseñar un sistema de alcantarillado para un caudal de diseño se comprueba que no se generen velocidades que produzcan erosión o socavación en los diferentes elementos de la conducción. Sin embargo, en ocasiones las condiciones topográficas no permiten mantener estas condiciones adecuadas, y será necesario de la implementación de estructuras especiales que permitan disipar la energía hidráulica contribuyendo al correcto funcionamiento de la red de tuberías.

Los disipadores de energía en los sistemas de alcantarillado son una parte esencial de la conducción ya que se encargan de reducir las grandes velocidades del flujo y de esta manera mantener la estructura en condiciones óptimas de operación.

Entre los años de 1958 y 1984 el Bureau of Reclamation publicó ocho ediciones de una monografía de disipadores de energía. En estos trabajos se describe el funcionamiento de los disipadores más importantes como: resalto hidráulico, estanques y pozos amortiguadores, soleras dentadas entre otros. Así como también accesorios como bloques o dados amortiguadores, dientes deflectores y umbrales terminales (Pardo Gómez et al., 2017).

Los tiempos requeridos en el estudio y diseño de estructuras especiales para sistemas de alcantarillado pueden llegar a ser extensos, debido a que la bibliografía se encuentra dispersa. Se busca optimizar recursos que permitan acortar este tiempo de búsqueda y aplicación de la teoría acerca de disipación de energía, generando aplicaciones computacionales.

La aplicación fue creada en el lenguaje de programación de libre acceso R y utiliza los parámetros hidráulicos y geométricos solicitados al usuario para dimensionar los disipadores más adecuados de las opciones presentadas.

Esta herramienta computacional permite el predimensionamiento de disipadores de energía en sistemas de alcantarillado. Los disipadores en pozos y en lugares intermedios de la conducción serán llamados en adelante como disipadores de línea y los disipadores que se encuentran en el sitio de la descarga serán disipadores de fin de línea.

Finalmente, los resultados se presentan mediante reportes en formato PDF de los disipadores analizados.

1.1 Objetivo general

Desarrollar una aplicación computacional básica en el lenguaje de programación R, que permita agilizar el proceso de dimensionamiento de estructuras disipadoras de energía en sistemas de alcantarillado.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión y recopilación bibliográfica acerca de la hidrodinámica del flujo en sistemas de alcantarillado y estructuras disipadoras de energía.
- Proponer una lógica de programación para la aplicación, en base a la información básica y los resultados requeridos.
- Desarrollar el código basado en la librería RMarkdown, que permita dimensionar los diferentes disipadores de energía propuestos.
- Desarrollar ejemplos de dimensionamiento para comprobar la funcionalidad de la aplicación.
- Desarrollar el manual de usuario de la aplicación computacional.

1.3 Alcance

Este componente de Trabajo de Integración Curricular consiste en crear una aplicación computacional básica que permita dimensionar disipadores de energía para sistemas de alcantarillado. El flujo en la tubería de ingreso al pozo y en la descarga se considerará unidimensional, permanente y uniforme para el análisis.

El código se desarrolla en el lenguaje de programación R. Se utilizan las características geométricas de los colectores y las condiciones hidrodinámicas del flujo para dimensionar los disipadores de energía. Los resultados se presentarán en un reporte generado a través de la librería RMarkdown de RStudio que es un procesador de texto el cual permite combinar texto narrativo con líneas de código de R con el fin de realizar la edición del documento en un solo lugar.

Se comprobó la funcionalidad de la aplicación mediante ejemplos de todos los disipadores analizados. Finalmente, se elaboró el manual de usuario, con el propósito de detallar las pautas necesarias para utilizar esta aplicación. En el manual se describe la utilización de las memorias de cálculo, el ingreso de datos y la generación de los reportes en formato (PDF).

1.4 Marco teórico

El análisis de los disipadores de energía se realizó bajo la consideración de flujo uniforme y la utilización de las ecuaciones básicas de la hidráulica. Los aspectos particulares de cada disipador, así como también sus límites, lineamientos y las fórmulas usadas para el dimensionamiento se describen en este capítulo.

Para determinar las características geométricas de un disipador de energía es necesario conocer los aspectos hidráulicos del flujo de aproximación. Tanto la geometría de la sección transversal del colector como algunos parámetros de diseño del tramo de alcantarillado son requeridos para el análisis del flujo.

Clasificación de los disipadores de energía

La clasificación de los disipadores de energía está sujeta a distintos parámetros según el criterio del autor por ejemplo pueden clasificarse: por expansión brusca, de impacto, por contracorriente, por macrorugosidad, mediante vórtice, entre otros.

En este trabajo se clasificaron a los disipadores de energía según su ubicación en la red de tuberías, si están ubicados en un pozo o en un punto intermedio del sistema de alcantarillado serán disipadores de línea y si se encuentran en el lugar de la descarga del colector serán disipadores de fin de línea. La clasificación que se propuso para los disipadores planteados se puede observar en la Figura 1.1.

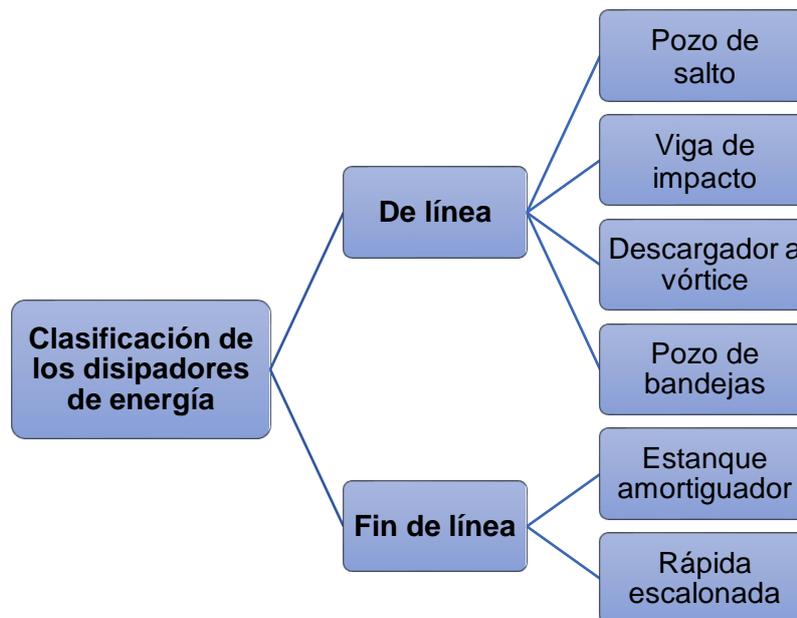


Figura 1.1. Clasificación de los disipadores de energía

Elaborado por: Daniel Campaña E.

A continuación, se muestra el resumen y una descripción de los disipadores utilizados en este trabajo de investigación.

➤ POZO DE SALTO

El pozo de salto es una estructura que permite dirigir un flujo de forma vertical entre dos colectores de distintas cotas (Llive, 2020). La altura a sortear debe ser máximo 0.75 m y el diámetro de la tubería de aproximación no debe ser mayor a 0.90 m.

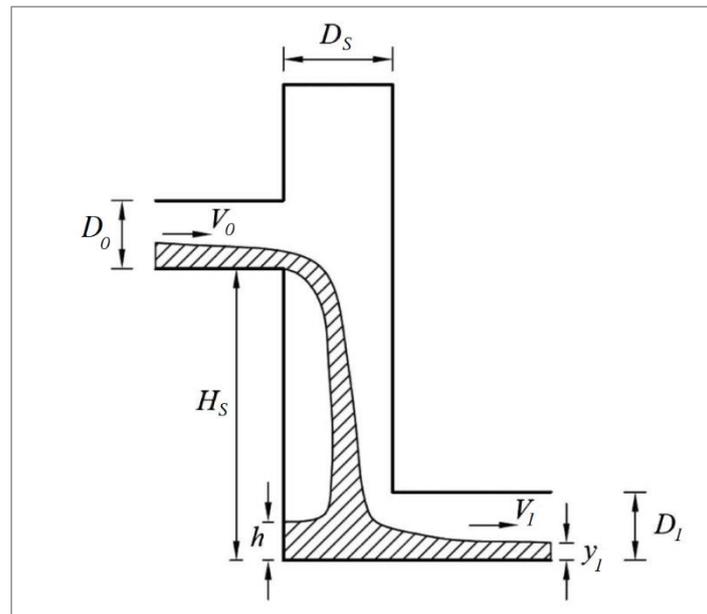


Figura 1.2. Esquema del disipador con pozo de salto
Fuente: (Crispino et al., 2022)

El pozo de salto es comúnmente usado como disipador de línea. La disipación de energía es causada por el impacto del flujo en las paredes del pozo y posteriormente en el colchón de agua al pie del pozo, la importancia de estas características depende de la geometría de pozo y del flujo supercrítico de aproximación (Crispino et al., 2022).

La ley de conservación de la energía dice que la energía antes del pozo y después del pozo deben ser iguales por lo que se debe considerar una pérdida de energía, como se muestra en la Ecuación 1.1.

$$E_1 = E_2 + H_m$$

Ecuación 1.1. Energía en el pozo de salto

Donde:

E_1 : Cota de la línea de energía en el colector de entrada. (m)

E_2 : Cota de la línea de energía en el colector de salida. (m)

H_m : Pérdida de carga. (m)

La energía en las secciones 1 y 2 corresponden a la carga piezométrica en cada sección, mientras que la pérdida de carga (H_m) se calcula con la Ecuación 1.2.

$$H_m = k \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g}$$

Ecuación 1.2. Pérdida de carga en el pozo de salto

Donde:

H_m : Pérdida de carga. (m)

k : Coeficiente de pérdida de carga. (0.5 - 1.0)

V_2 : Velocidad del flujo en la sección 2. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

▪ **Factor de pérdida de carga (K)**

En estudios experimentales realizados por Christodoulou en 1991, se calculó la pérdida de carga total (ΔH) en función de la altura de caída (H_s) que varió entre 15 - 50 cm. Para este cálculo se consideraron parámetros como el diámetro del pozo, la altura de caída, el diámetro de la tubería de ingreso, la pendiente longitudinal de la tubería de ingreso y la velocidad del flujo de aproximación. Estos estudios demostraron que combinando estos parámetros hidráulicos y geométricos el coeficiente de pérdida de carga estaba representado por la Ecuación 1.3, (Crispino et al., 2022, p. 2216).

$$K = 0.2 + 2.3 \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot H_s}}{V_o} \right)^{2.25}$$

Ecuación 1.3. Pérdida de carga según Christodoulou (1991)

Donde:

K : Factor de pérdida de carga.

$\sqrt{g \cdot H_s}/V_o$: Parámetro de caída.

H_s : Altura de caída del pozo. (m)

V_o : Velocidad del flujo de aproximación. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

Nota: Esta ecuación es válida tanto para tuberías aguas arriba y aguas abajo alineadas y desalineadas y para un parámetro de caída menor a 1.50 m.

Si el régimen del flujo es libre, luego de ingresar en la tubería de salida del pozo existen tres opciones de caída como se observa en la Figura 1.3, a) el flujo golpea en el fondo del pozo, b) el flujo golpea en la entrada del colector de salida, c) el flujo golpea en el muro opuesto del pozo.

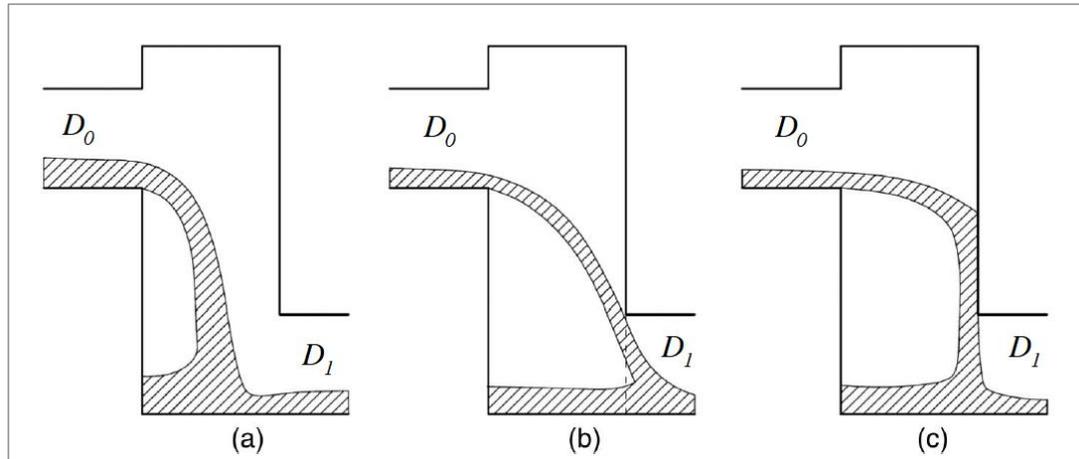


Figura 1.3. Choque del flujo dentro del pozo de salto

Fuente: (Ma et al., 2017)

Otros estudios realizados por Fereshtehpour y Chamani en 2020, fueron similares a los anteriores, pero con la excepción de que usaron una placa deflectora suspendida dentro del pozo, demostraron que la placa deflectora no afectó significativamente la pérdida de carga sino hasta alturas de caída mayores a (1.50 m). La eficiencia de la disipación de energía se calculó mediante el coeficiente de pérdida de carga (K) como se muestra en la Ecuación 1.4, (Crispino et al., 2022, p. 2216).

$$K = 0.20 + 2.30 \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot H_s}}{V_o} \right)^{2.25}$$

Ecuación 1.4. Pérdida de carga (Christodoulou, 1991)

Donde:

K : Factor de pérdida de carga.

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

H_s : Altura de caída del pozo. (m)

V_o : Velocidad del flujo en la tubería de aproximación. (m/s)

La Ecuación 1.4 es válida cuando el parámetro de caída es menor a 1.5. Cuando el parámetro de caída calculado es mayor se debe utilizar la Ecuación 1.5.

$$K = 0.50 + 1.93 \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot H_s}}{V_o} \right)^2$$

Ecuación 1.5. Coeficiente de pérdida de carga (Fereshtehpour y Chamani 2020)

Donde:

K : Factor de pérdida de carga.

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

H_s : Altura de caída del pozo. (m)

V_o : Velocidad del flujo en la tubería de aproximación. (m/s)

En la Figura 1.4 se observar la representación de las ecuaciones asumidas para el cálculo del coeficiente de pérdida de carga en el pozo de salto.

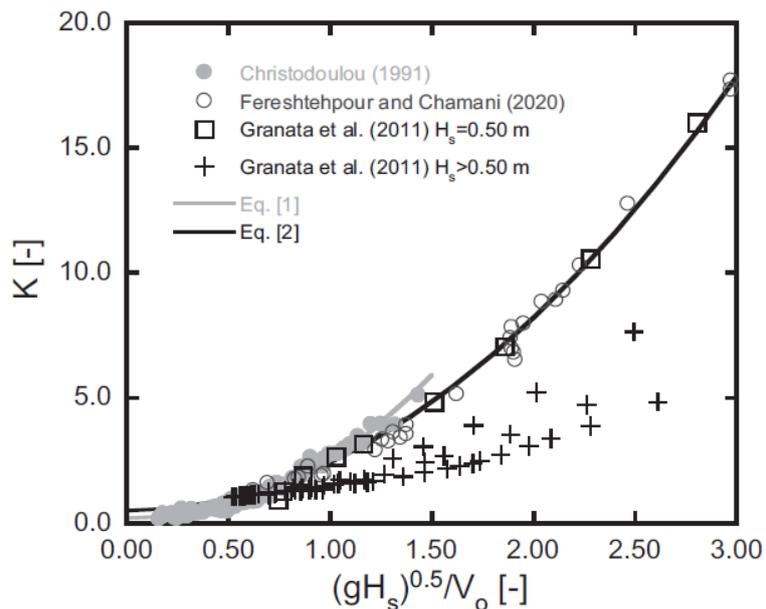


Figura 1.4. Coeficiente de pérdida de carga función del parámetro de caída

Fuente: (Crispino et al., 2022, p. 2217)

▪ **Número de impacto (I)**

Este parámetro representa la relación entre el rango del chorro de agua y el diámetro del pozo. Si su valor es menor a 1, el chorro impacta en el fondo del pozo y si es mayor a 1 impacta en pared opuesta del pozo (Granata et al., 2009, p. 2314).

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot H_s}{g}} \cdot \frac{V_o}{D_s}$$

Ecuación 1.6. Número de impacto

Donde:

I : Número de impacto.

H_s : Altura de caída del pozo. (m)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

V_0 : Velocidad del flujo en la tubería de aproximación. (m/s)

D_s : Diámetro del pozo. (m)

➤ ESTANQUE AMORTIGUADOR

El estanque amortiguador disipa la energía del flujo supercrítico mediante la formación de un resalto hidráulico antes de devolver el flujo al cauce de un río. Estos disipadores constan de una solera la cual debe ser igual o mayor a la longitud del resalto (Del Toro Ávila, 2013). La cota del fondo del estanque coincide con la cota del canal de salida. Se utiliza como disipador de fin de línea por el espacio que necesita para su construcción.

Este disipador puede tener distintos accesorios como dados amortiguadores, dientes deflectores o umbrales terminales los cuales contribuyen a la estabilización del resalto en el estanque (Pardo Gómez et al., 2017). La USBR propone cuatro tipos de estanque amortiguador los cuales dependen del número de Froude y de la velocidad.

Los diseños de los estanques amortiguadores fueron realizados en base a pruebas experimentales comprobados con el funcionamiento de prototipos (Chanson, 2015, p. 89). Los tipos de estanques amortiguadores se representan en la Figura 1.5.

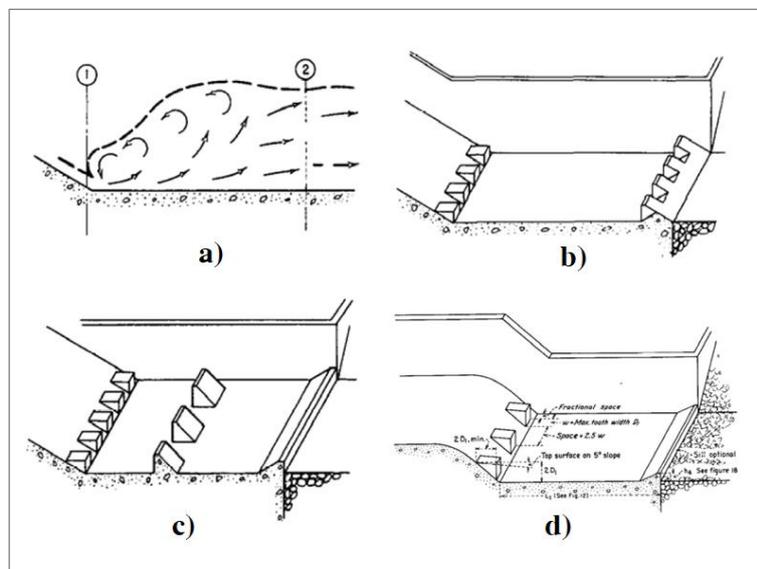


Figura 1.5. Esquema de disipadores con estanque amortiguador

Fuente: (Peterka, 1984)

- a) Estanque USBR tipo I
- b) Estanque USBR tipo II
- c) Estanque BUREC tipo III
- d) Estanque BUREC tipo IV

Los tipos de estanques mencionados anteriormente se los puede considerar como estructuras estándar, siempre y cuando se cumplan las condiciones establecidas. El número de Froude y la velocidad antes del resalto definirán el tipo de estanque. Se realiza estas consideraciones para proporcionar al estanque los accesorios necesarios los cuales permitan contener al resalto, reducir la longitud de la solera y evitar problemas en los accesorios colocados. En la Tabla 1.1 se muestran los rangos de velocidad y número de Froude para seleccionar el tipo de estanque.

Tabla 1.1. Tipos de estanque amortiguador según el número de Froude

Estanque Tipo	Número de Froude (Fr)	Velocidad (V)
I	$1.7 < Fr_1 < 2.5$	-
II	$4.5 < Fr_1 < 17$	$V > 18 \text{ m/s}$
III	$4.5 < Fr_1 < 17$	$V < 18 \text{ m/s}$
IV	$2.5 < Fr_1 < 4.5$	-

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Nota: El número de Froude (Fr_1) corresponde a la sección transversal antes del resalto hidráulico.

El estanque amortiguador **tipo I**, tiene forma rectangular con fondo plano, no tiene accesorios y la disipación de energía ocurre por un resalto hidráulico clásico. Usualmente no se recomienda este tipo de disipador por el alto costo ya que necesita una gran longitud para contener al resalto (Chanson, 2015, p. 89).

Es estanque amortiguador **tipo II**, se utiliza cuando se tiene caudales menores a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y una velocidad máxima de flujo de 30 m/s , ya que de ser mayor puede tener problemas de cavitación. El estanque cuenta con dientes deflectores al inicio y al final del estanque.

El estanque amortiguador **tipo III**, se considera para caudales bajos con una velocidad máxima de 18 m/s .

El estanque amortiguador **tipo IV**, se considera para valores bajos del número de Froude entre $2.5 \leq Fr < 4.5$. Se desarrolló para resaltos hidráulicos oscilatorios, cuenta con dientes deflectores al inicio y un umbral terminal al final de la solera (Chanson, 2015, p. 91).

- **Calados conjugados**

Los calados conjugados representan la profundidad del flujo antes y después del resalto hidráulico respectivamente (Sotelo Ávila, 1997, p. 285). Existe resalto siempre y cuando se satisfaga la Ecuación 1.7.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right)$$

Ecuación 1.7. Calados conjugados en el resalto hidráulico

Donde:

y_2 : Calado del flujo después del resalto. (m)

y_1 : Calado del flujo antes de resalto. (m)

Fr_1 : Número de Froude antes del resalto.

- **Longitud de la solera (L_B)**

Para números de Froude en el rango de $1.7 \leq Fr \leq 17$, la longitud de la solera viene dada por la Ecuación 1.8.

$$L_B = \frac{4.5 \cdot y_2}{C \cdot Fr_1^{0.76}}$$

Ecuación 1.8. Longitud de la solera

Donde:

L_B : Longitud de la solera. (m)

y_2 : Profundidad del flujo después del resalto hidráulico. (m)

C : Coeficiente de longitud de solera.

Fr_1 : Número de Froude antes del resalto hidráulico.

- **Coeficiente de longitud de solera (C)**

El Saint Anthony Falls (SAF) redefinió el diseño de la longitud de la solera del estanque amortiguador, la cual es función del coeficiente de longitud de la solera que viene dada por la Ecuación 1.9.

$$C = 1.1 - \frac{Fr_1^2}{120} \quad \text{para: } 1.5 < Fr_1 < 5.5$$

$$C = 0.85 \quad \text{para: } 5.5 < Fr_1 < 11$$

$$C = 1 - \frac{Fr_1^2}{800} \quad \text{para: } 11 < Fr_1 < 17$$

Ecuación 1.9. Coeficiente de longitud de solera

Donde:

C : Coeficiente de longitud de solera.

Fr_1 : Número de Froude antes del resalto hidráulico.

- **Ancho del estanque amortiguador (W_B)**

EL ancho del estanque amortiguador es función del diámetro de la tubería de aproximación y viene dado por la Ecuación 1.10.

$$W_B = 1.7 \cdot D_0 \cdot \frac{Q_d}{g^{0.5} \cdot D_0^{2.5}}$$

Ecuación 1.10. Ancho del estanque amortiguador

Donde:

W_B : Ancho del estanque amortiguador. (m)

D_0 : Diámetro de la tubería de aproximación. (m)

Q_d : Caudal de diseño. (m³/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

- **Pérdida de energía**

La pérdida de energía es igual a la diferencia de energías específicas antes y después del resalto (Chow, 1994, p. 388). Esta variación de energías se la puede calcular en función de los calados del flujo antes y después del resalto como se muestra en la Ecuación 1.11.

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2}$$

Ecuación 1.11. Pérdida de energía en el resalto hidráulico

Donde:

ΔE : Pérdida de energía en el resalto hidráulico. (m)

E_1 : Energía específica del flujo en la sección contraída del resalto. (m)

E_2 : Energía específica del flujo en la sección después del resalto. (m)

y_1 : Profundidad del flujo antes de resalto. (m)

y_2 : Profundidad del flujo después de resalto. (m)

- **Energía antes de resalto hidráulico (E_1)**

Como el resalto se produce en un canal horizontal, la energía específica es igual a la carga piezométrica antes del resalto y se la puede calcular también en función del número de Froude en dicha sección (Sotelo Ávila, 2002, p. 326) como se muestra en la Ecuación 1.12.

$$E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = y_1 + \frac{Fr_1^2 \cdot A_1}{2 \cdot T_1}$$

Ecuación 1.12. Energía específica antes del resalto hidráulico

Donde:

E_1 : Energía específica del flujo en la sección contraída del resalto. (m)

y_1 : Profundidad del flujo antes del resalto. (m)

V_1 : Velocidad media del flujo antes del resalto. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

Fr_1 : Número de Froude antes de resalto.

A_1 : Área hidráulica antes del resalto. (m²)

T_1 : Ancho superficial antes del resalto. (m)

- **Energía después del resalto hidráulico (E_2)**

La energía específica después del resalto también se la puede calcular en función del número de Froude como se muestra en la Ecuación 1.13.

$$E_2 = y_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = \frac{Fr_1^2 \cdot A_1^3}{2 \cdot T_1 \cdot A_2^2}$$

Ecuación 1.13. Energía específica después del resalto hidráulico

Donde:

E_2 : Energía específica del flujo después del resalto. (m)

y_2 : Profundidad del flujo después del resalto. (m)

V_2 : Velocidad media del flujo después del resalto. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

Fr_1 : Número de Froude antes de resalto.

A_1 : Área hidráulica antes del resalto. (m²)

T_1 : Ancho superficial antes del resalto. (m)

A_2 : Área hidráulica después del resalto. (m²)

- **Eficiencia del resalto**

Como el resalto se producirá en una superficie horizontal se puede calcular la eficiencia de la pérdida de energía en función de las cargas hidráulicas antes y después del resalto como se muestran en la Ecuación 1.14.

$$\eta = \frac{h_s}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1}$$

Ecuación 1.14. Eficiencia del resalto hidráulico

Donde:

η : Eficiencia del resalto hidráulico.

h_s : Pérdida de energía en el resalto hidráulico. (m)

H_1 : Carga hidráulica antes del resalto. (m)

H_2 : Carga hidráulica después del resalto. (m)

➤ **VIGA DE IMPACTO**

La disipación de energía por impacto ocurre cuando el flujo de agua choca contra un obstáculo lo que provoca turbulencia y cambio de dirección de la velocidad del flujo y esto hace que se reduzca su energía cinética. Este disipador es utilizado comúnmente en flujos con velocidades relativamente bajas para evitar erosión y cavitación en la estructura (Chanson, 2015).

Este disipador no requiere de demasiado espacio ya que no se formará un resalto en el fondo de la cámara de disipación por lo que puede ser utilizado como disipador de línea en los pozos de revisión o de fin de línea en una descarga, siempre y cuando el flujo no supere los límites recomendados.

En la Figura 1.6 se muestra un esquema del disipador con viga de impacto.

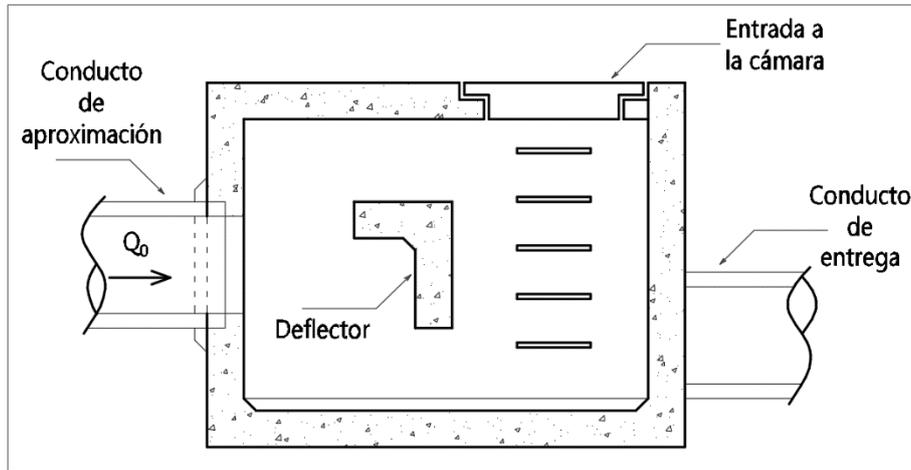


Figura 1.6. Esquema del dissipador con viga de impacto
Elaborado por: Daniel Campaña E.

A partir del caudal de diseño y datos geométricos del conducto de aproximación se calculan los parámetros hidrodinámicos del flujo a la entrada del pozo, los cuales permiten definir el tipo de flujo que llega a la cámara de disipación.

La velocidad del flujo de aproximación se calcula con la ecuación de Darcy-Weisbach que utiliza datos medibles del colector, como la pendiente longitudinal (S_0), la rugosidad absoluta (ϵ).

- **Área hidráulica en la cámara de disipación (A)**

El área hidráulica de la cámara de disipación se calcula como el área total de la sección transversal del colector que llega al pozo. Debido a que aún no se conocen las dimensiones de la cámara, el valor de (A) adopta dicha área como se muestra en la Ecuación 1.15.

$$A = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4}$$

Ecuación 1.15. Área hidráulica de la cámara de disipación

Donde:

A : Área hidráulica de la cámara de disipación. (m^2)

D_0 : Diámetro de la tubería de aproximación. (m)

- **Profundidad equivalente (y_e)**

La profundidad equivalente del flujo en la cámara de disipación es el calado de agua que se asume para el cálculo del número de Froude dentro de la cámara. Se lo estima mediante la Ecuación 1.16.

$$y_e = \sqrt{\frac{A}{2}}$$

Ecuación 1.16. Profundidad equivalente de la cámara de disipación

Donde:

y_e : Profundidad equivalente del flujo. (m)

A : Área hidráulica de la cámara de disipación. (m²)

▪ **Ancho de la cámara de disipación (W)**

El ancho de la cámara de disipación se calcula con la Figura 1.7 la cual necesita como parámetro al número de Froude del flujo de aproximación, conocido este valor se obtiene la relación (W/d).

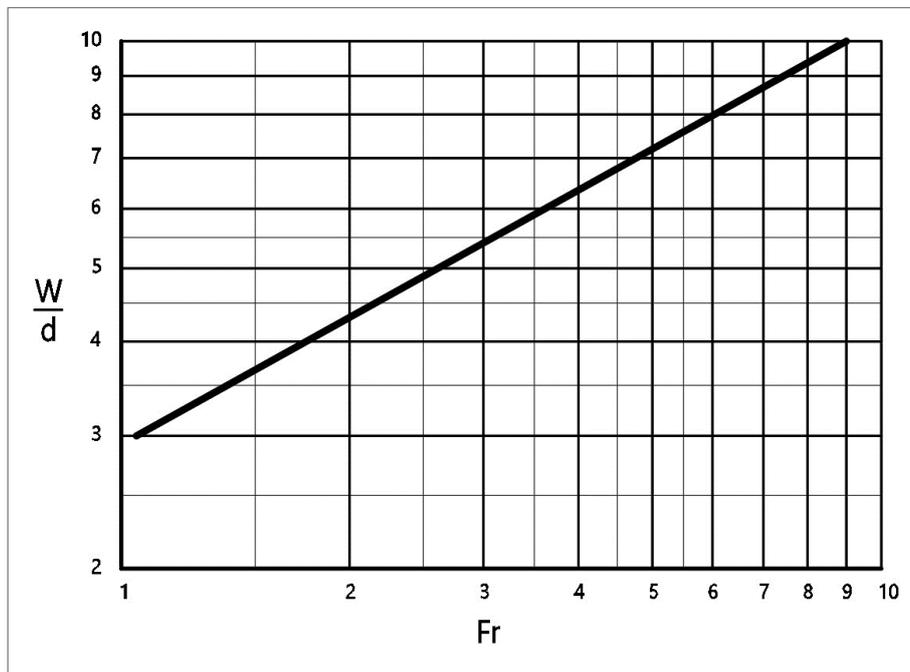


Figura 1.7. Ancho del dissipador tipo viga de impacto

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Fuente: (Design of small canal structures, 1978, p. 310)

Nota: El número de Froude se calcula con la Q y la profundidad hidráulica es $d=A/T$.

Esta relación también se puede calcular mediante un fórmula recomendada por la USBR, la cual es función del número de Froude (Chanson, 2015, p. 133). Esta expresión se muestra en la Ecuación 1.17.

$$\frac{W}{d} = 2.868 \cdot F_r^{0.5664}$$

Ecuación 1.17. Relación, ancho vs profundidad hidráulica (W/d)

Donde:

W/d : Relación para obtener el ancho de la cámara de disipación.

W : Ancho de la cámara de disipación. (m)

d : Profundidad característica. (m)

F_r : Número de Froude.

Nota: La profundidad característica (d) a la que hace referencia la Ecuación 1.17 es de la tubería de ingreso.

▪ **Trayectoria del flujo (y)**

En la tubería de aproximación se considera que la trayectoria del flujo es parabólica para estimar el alcance que tendrá el chorro de agua hasta la viga. Se utiliza la Ecuación 1.18 para calcular la trayectoria del flujo desde la salida de la tubería hasta que cae al fondo de la cámara de disipación.

$$y = \Delta Z - \left(\frac{g}{2 \cdot V_0^2} \right) \cdot x^2$$

Ecuación 1.18. Trayectoria del flujo de agua

Donde:

y : Variación del flujo en el eje de las ordenadas. (m)

ΔZ : Altura de caída del pozo. (m)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

V_0 : Velocidad del flujo de aproximación. (m/s)

x : Variación del flujo en el eje de las abscisas. (m)

▪ **Limitaciones de la viga de impacto**

Para realizar el diseño de la viga de impacto se deben seguir las siguientes condiciones realizadas por la USBR (Peterka, 1984, p. 81):

- El número de Froude menor a nueve ($F_r \leq 9$)
- La máxima velocidad del flujo de aproximación debe ser ($V_{\max} \leq 9$ m/s).
- El máximo caudal de descarga será de ($Q_d \leq 10$ m³/s).

➤ RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO

La rápida de fondo escalonado disipa la energía cinética del flujo, esta disipación depende principalmente del caudal, la velocidad y de la geometría de los escalones. El método constructivo se lo puede realizar con hormigón compactado o con gaviones (Chanson, 2015, p. 46).

Si el flujo cae de un escalón a otro se considera flujo saltante o escalón por escalón en adelante conocido como (**FEXE**), si las velocidades son un poco más altas y no está bien definida la superficie del flujo se conoce como flujo **en transición**, si el fondo falso del flujo apenas y parece tocar los extremos de los escalones y se producen remolinos con introducción de aire en los espacios entre los escalones se llama flujo rasante en adelante conocido como (**FRAS**).

Los tipos de flujo en una rápida se muestran en la Figura 1.8 y son:

- a) Flujo saltante
- b) Flujo en transición
- c) Flujo rasante

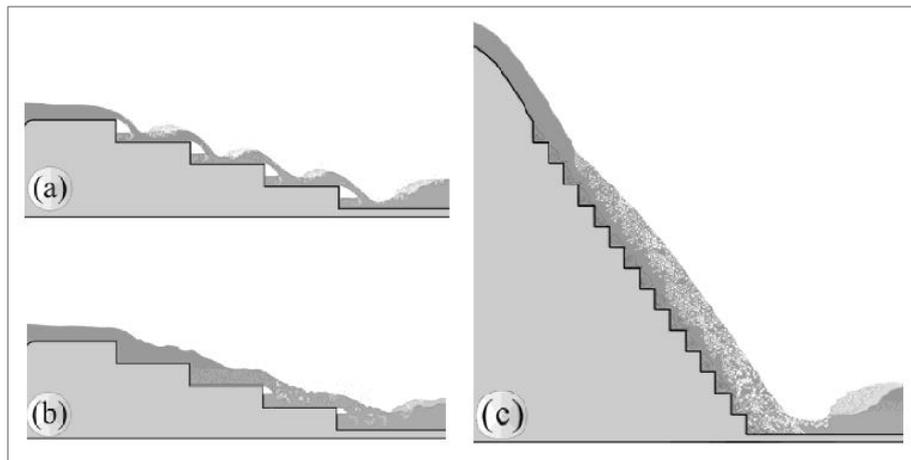


Figura 1.8. Tipos de flujo en una rápida con fondo escalonado

Fuente: (Andrade et al., 2012)

Existen varios autores que han establecido ecuaciones de los límites para FRAS y FEXE, entre ellos Ohtsu & Yasuda, Chanson, entre otros. Las ecuaciones de algunos autores de los límites para FRA se ilustran estas ecuaciones para dichos autores en los diferentes límites del flujo sobre una rápida de fondo escalonado (Andrade et al., 2012).

Se realizó una comparación de las ecuaciones de límite inferior para flujo rasante de dichos autores y se escogió aquella que representaba el promedio entre todas estas. Se puede observar la comparación de estas curvas en la Figura 5.1 del Anexo IV.

En el flujo rasante se distinguen cuatro zonas que contempla el tipo de flujo y el punto de inicio de la aireación como se puede observar en la Figura 1.9 y son:

- a) Zona no aireada
- b) Zona de flujo rápidamente variado
- c) Zona de flujo gradualmente variado
- d) Zona de flujo uniforme

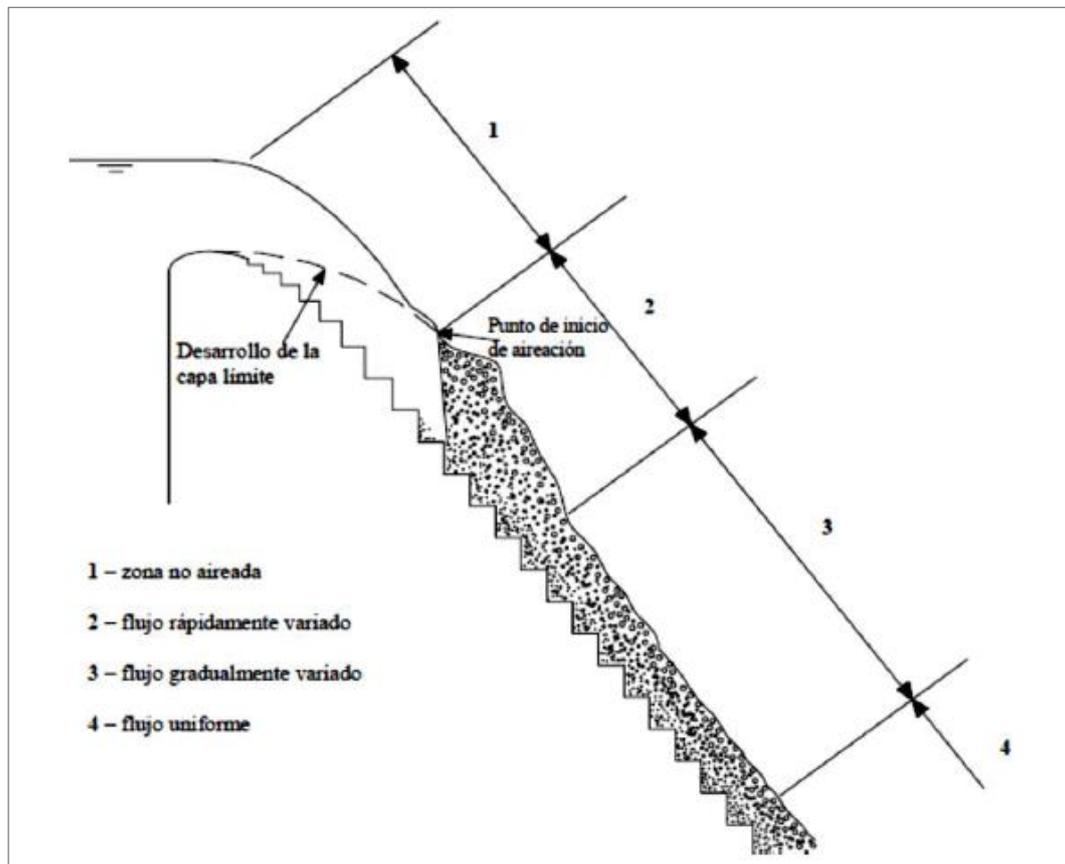


Figura 1.9. Zonas de flujo en la rápida escalonada

Fuente: (Del Toro Ávila, 2013, p. 45)

Los parámetros más importantes en el diseño de la rápida con fondo escalonado son la altura del escalón, el caudal de diseño y el tirante crítico (Del Toro Ávila, 2013). El tirante crítico y la altura del escalón están directamente relacionados con la rugosidad (K) que tiene la rápida.

Varios autores han desarrollado sus propias ecuaciones para delimitar el tipo de flujo sobre una rápida de fondo escalonado cuyo valor de (y_c/h) debe ser mayor que el mostrado en la Ecuación 1.19, de autores basado en Chanson (Castillón y Tipán, 2023, p. 7).

$$\frac{y_c}{h} = \frac{0.881}{\left(\frac{h}{T} + 0.149\right)^{0.317}}$$

Ecuación 1.19. Límite inferior FRAS

Donde:

y_c/h : Relación calado crítico - contrahuella.

h/l : Relación altura-longitud del escalón.

- **Calado crítico (y_c)**

Es la altura del flujo para la cual la energía específica en la sección es mínima.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Ecuación 1.20. Calado crítico

Donde:

y_c : Calado crítico. (m)

q : Caudal unitario. (m³/s/m)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

- **Calado normal (y_n)**

El calado normal se calcula con la expresión de Boes y Hager (Khatsuria, 2005, p. 109), como se muestra en la Ecuación 1.21.

$$y_n = 0.215 \cdot y_c \cdot [\sin(\theta)]^{-1/3}$$

Ecuación 1.21. Calado normal

Donde:

y_n : Calado normal. (m)

y_c : Calado crítico. (m)

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. (°)

- **Rugosidad relativa del escalón (K_i)**

Es la rugosidad del fondo escalonado en función de la altura del escalón y el ángulo de diseño de la rápida.

$$K_i = h \cdot \cos(\alpha)$$

Ecuación 1.22. Rugosidad relativa del escalón

Donde:

- K_i : Rugosidad relativa del escalón.
- h : Altura de la contrahuella. (m)
- α : Ángulo de diseño de los escalones. (°)

▪ **Froude de rugosidad (F_i)**

Existen varias formas de calcular este valor que depende del caudal, la rugosidad y la relación de la contrahuella y la huella del escalón.

$$F_i = \frac{q}{\sqrt{g \cdot \left(\frac{h}{l}\right) \cdot K_i^3}}$$

Ecuación 1.23. Froude de rugosidad

Donde:

- F_i : Froude de rugosidad.
- q : Caudal unitario. (m³/s/m)
- g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)
- h/l : Relación altura-longitud del escalón.
- K_i : Rugosidad relativa del escalón.

▪ **Parámetro de vertido (A)**

$$A = \left(\frac{f_e}{8 \cdot \sin(\alpha)}\right)^{1/3} \cdot \cos(\alpha) + \frac{\alpha}{2} \cdot \left(\frac{f_e}{8 \cdot \sin(\alpha)}\right)^{-2/3}$$

Ecuación 1.24. Parámetro de vertido

Donde:

- A : Parámetro de vertido.
- f_e : Factor de fricción.
- α : Ángulo de inclinación de la rápida. (rad)

- **Energía al inicio de la rápida (E_1)**

La energía en la cima de la rápida escalonada se estima mediante la Ecuación 1.25.

$$E_1 = \frac{2}{3} \cdot y_c + H_s$$

Ecuación 1.25. Energía al inicio de la rápida

Donde:

E_1 : Energía al inicio de la rápida. (m)

y_c : Tirante crítico. (m)

H_s : Desnivel entre colectores. (m)

- **Energía disipada (ΔE)**

Es la energía perdida a lo largo de toda la rápida.

$$\Delta E = y_c \cdot \left(\frac{3}{2} + \frac{H_s}{y_c} - A \right)$$

Ecuación 1.26. Energía disipada en la rápida

Donde:

ΔE : Energía disipada. (m)

y_c : Tirante crítico. (m)

H_s : Desnivel entre colectores. (m)

A : Parámetro de vertido.

- **Energía al pie de la rápida (E_2)**

La energía al pie de la rápida se calcula por la diferencia de energías entre la energía al inicio menos la energía disipada como se muestra en la Ecuación 1.27.

$$E_2 = E_1 - \Delta E$$

Ecuación 1.27. Energía al pie de la rápida

Donde:

E_2 : Energía al pie de la rápida. (m)

E_1 : Energía al inicio de la rápida. (m)

ΔE : Energía disipada. (m)

➤ DESCARGADOR A VÓRTICE

El dissipador de energía con descargador a vórtice según la forma de la cámara de entrada puede tener las siguientes formas de flujo: circular, tangencial, espiral, helicoidal. Para flujo helicoidal se tiene que la geometría con forma de caracol de la cámara de entrada tiene ciertas variaciones dependiendo del tipo de flujo en el canal de aproximación.

▪ Radios al eje del colector (*a*)

Este parámetro se mide desde el eje central del tubo vertical hasta el centro del eje longitudinal del canal de aproximación. La expresión para calcular este valor depende del tipo de flujo que llega a la cámara de entrada. La fórmula para flujo subcrítico se muestra en la Ecuación 1.28.

$$a = 0.5 \cdot (D_s + b_0) + \Delta R + c_{sb} + s$$

Ecuación 1.28. Radio al eje del canal - Flujo subcrítico

Donde:

a: Radio al eje del canal. (m)

D_s: Diámetro del pozo vertical. (m)

b₀: Ancho del canal de aproximación. (m)

ΔR : Radio del chaflán al inicio del pozo vertical. (m)

c_{sb}: Distancia constructiva. (m)

s: Distancia constructiva. (m)

Para flujo supercrítico, el radio al centro de eje del canal se representa por la Ecuación 1.29.

$$a = 0.5 \cdot D_s + b_0 + s_1$$

Ecuación 1.29. Radio al eje del canal - Flujo supercrítico

Donde:

a: Radio al eje del canal. (m)

D_s: Diámetro del pozo vertical. (m)

b₀: Ancho del canal de aproximación. (m)

s₁: Distancia constructiva. (m)

▪ Centros de los radios de giro (*o*)

Los radios de giro de la cámara de entrada tipo caracol se trazan desde el eje del pozo vertical desfasados una excentricidad. Para flujo subcrítico esta distancia se calcula como se muestra en la Ecuación 1.30.

$$e = \frac{b_0 + s}{7}$$

Ecuación 1.30. Excentricidad para flujo subcrítico

Donde:

e : Excentricidad para los centros de los radios. (m)

b_0 : Ancho del canal de aproximación. (m)

s : Distancia constructiva. (m)

Para flujo supercrítico estas excentricidades tienen una variación distinta, pero tiene la particularidad que todas se encuentran en el eje (y). Se calculan según la Ecuación 1.31.

$$e_1 = a - R_1$$

$$e_2 = 0.5 \cdot D_s + s + c_{sp} - R_2$$

$$e_3 = a - b_0 - R_1$$

Ecuación 1.31. Excentricidades para flujo supercrítico

Donde:

e : Excentricidades para los centros de los radios. (m)

a : Radio al eje del canal. (m)

D_s : Diámetro del pozo vertical. (m)

b_0 : Ancho del canal de aproximación. (m)

s : Distancia constructiva. (m)

c_{sp} : Distancia constructiva. (m)

R_1 : Radio de giro 1. (m)

R_2 : Radio de giro 2. (m)

▪ **Pozo vertical**

El pozo vertical se encarga de transportar el flujo desde la cámara de entrada hasta la cámara de disipación. El diámetro del pozo vertical (D_s) debe garantizar la formación de un núcleo de aire en su centro para tener una caída estable y libre de fluctuaciones de profundidad y presión.

Los valores del factor de seguridad (η) se encuentran entre 0.83 - 2. Estudios en laboratorio sugieren tomar un valor de $\eta = 1.25$ con el fin de cumplir con un correcto dimensionamiento (Haro y Jara, 2006, p. 82). El diámetro del pozo se calcula con la Ecuación 1.32.

$$D_s = \eta \cdot \left(\frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5}$$

Ecuación 1.32. Diámetro del pozo vertical

Donde:

D_s : Diámetro del pozo vertical. (m)

η : Factor de seguridad.

Q_d : Caudal de diseño. (m³/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

➤ **POZO DE BANDEJAS**

El pozo de bandejas es una estructura formada por la sucesión en vertical de bandejas intercaladas entre sí a lo largo del desnivel a sortear. Permite realizar cambios de nivel y de dirección ya que el flujo desciende verticalmente bandeja por bandeja. La altura del desnivel entre colectores debe ser mayor a 2 m. La disipación de energía ocurre debido al cambio brusco de dirección y al choque del flujo en las bandejas inferiores (Haro y Jara, 2006, p. 12).

▪ **Pozo de disipación**

Las dimensiones de las bandejas, así como su separación en elevación (H) se definen a partir de una ecuación general para el dimensionamiento de las bandejas. Como se muestra en la Ecuación 1.33.

$$L_i = 0.142 \cdot K \cdot Q_d^{2/5}$$

Ecuación 1.33. Ecuación de dimensiones para el pozo de bandejas

Donde:

L_i : Ecuación de dimensiones del pozo de bandejas. (m)

K : Constantes de dimensionamiento para cada L_i .

Q_d : Caudal de diseño. (m³/s)

Nota: La Ecuación 1.33 se utiliza con la Tabla 1.2 para definir las dimensiones del pozo como se muestran en la Figura 1.10.

Tabla 1.2. Constantes de dimensionamiento (K) para pozo de bandejas

Li	Descripción	K
A	Ancho del pozo (m)	1.000
B	Separación de la pared frontal a la reja (m)	0.190
C	Longitud de la reja (m)	0.260
D	Separación de la pared lateral a la reja (m)	0.050
E	Ancho de la reja (m)	0.046
H	Altura entre bandejas (m)	0.750

Fuente: (Haro y Jara, 2006)

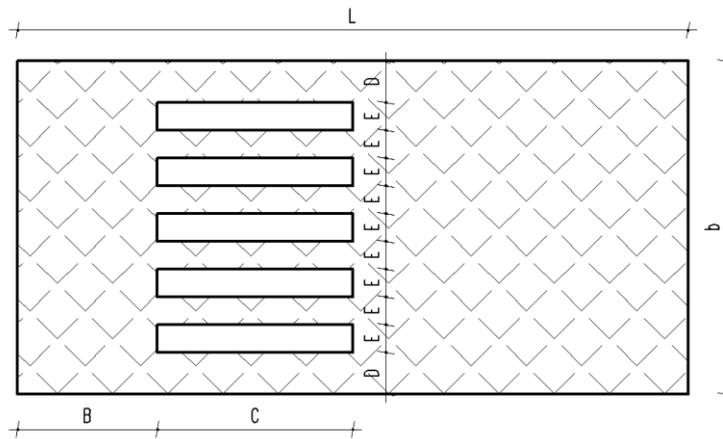


Figura 1.10. Dimensiones de las bandejas

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Los valores obtenidos de la Ecuación 1.33, deben compararse con los valores mínimos de la Tabla 1.3, y verificar que las dimensiones cumplan con las mínimas establecidas.

Tabla 1.3. Dimensiones mínimas para pozo de bandejas

Li	Dimensión Mínima (m)
A	3.30
B	0.53
C	1.02
D	0.24
E	0.15
H	1.65

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Fuente: (Haro y Jara, 2006)

- **Consideraciones para el uso de bandejas inclinadas**

Las consideraciones a tener en cuenta para la utilización de las bandejas son:

- a) La relación dimensional de bandejas entre el ancho y la longitud de bandejas.

$$L = 2 \cdot B$$

- b) La relación entre el área de bandejas y de orificios es del (14%).
- c) La relación entre las distancias B y C.

$$\frac{B}{C} = \frac{0.19}{0.26}$$

Donde B es la longitud más corta desde la reja al extremo de la bandeja y C es longitud de la reja a lo ancho.

- d) La inclinación a partir de la segunda bandeja será de 5%.

- **Cámara de disipación**

La cámara de disipación al pie del pozo se encarga de disipar la energía remanente antes de entregar el flujo al colector de salida. Esta cámara debe tener una altura mínima que será igual a la Ecuación 1.34.

$$H_{mín} = 1.20 \cdot H$$

Ecuación 1.34. Altura mínima de la cámara al pie

Donde:

$H_{mín}$: Altura mínima de la cámara de disipación al pie de pozo. (m)

H : Altura entre bandejas. (m)

- **Caudal máximo**

El caudal en exceso que puede admitir el dissipador de bandejas es un 50% del caudal de diseño, se calcula con la Ecuación 1.35.

$$Q_{máx} = 1.5 \cdot Q_d$$

Ecuación 1.35. Caudal máximo del pozo de bandejas

Donde:

$Q_{máx}$: Caudal máximo en el pozo de bandejas. (m³/s)

Q_d : Caudal de diseño. (m³/s)

1.5 Estado del arte

En la Tabla 1.4, se muestra una recopilación de algunos documentos técnicos utilizados en el presente trabajo.

Tabla 1.4. Documentos técnicos de consulta

Autor (es)	Título	Análisis
Crispino G., Contestabile P., Vicinanza D. & Gissoni C.	Energy dissipation in sewer fall manholes. (2022)	El coeficiente de descarga es función únicamente del parámetro de caída. Y se utiliza una ecuación cuando el pozo tiene un deflector y otra cuando no lo tiene.
Castillón C. & Tipán W.	Análisis CDF del porcentaje de disipación de energía en rápidas escalonadas con flujo rasante para caudales pluviales de las zonas norte, centro y sur de la ciudad de Quito. (2023)	La ecuación del límite inferior para flujo rasante (FRAS) de autores basados en Chanson es básicamente un promedio de otras observaciones experimentales como se muestra en la Figura 5.1.
Hajiahmadi A, Crispino G, Ghaeini M., & Gissoni C.	Effect of the flow regime on the hydraulic features governing the operation of vortex drop shafts with spiral inlets. (2022)	El descargador a vórtice tiene una alta eficiencia en disipación de energía llegando a valores cercanos al 90%, esto se debe a que trabajan en conjunto la cámara de entrada que induce al flujo a una trayectoria helicoidal a través del pozo vertical y la cámara de disipación al pie del pozo que disipa la energía residual.
Haro P. & Jara M. F.	Manual básico de diseño de estructuras de cambio de nivel y cambio de dirección con flujo a gravedad. (2006)	El dimensionamiento de la cámara de entrada se realiza de forma diferenciada para flujo subcrítico y supercrítico. El pozo de bandejas se diseña para flujo subcrítico y una inclinación de bandejas del 5%.
Haro P., Hidalgo X., Jara F. & Castro M.	Eficiencia en la disipación de energía en estructuras para cambio simultáneo de nivel y de dirección en sistemas de alcantarillado en ciudades andinas. (2017)	El pozo de bandejas es una estructura que presenta ciertas limitaciones y requiere un adecuado mantenimiento para mantener su eficiencia hidráulica.

Elaborado por: Daniel Campaña E.

2 METODOLOGÍA

La metodología presenta los pasos que se llevaron a cabo para desarrollar la aplicación **DDissipator v1.0**. La aplicación en su primera versión cuenta con seis archivos en formato (Rmd), los cuales se ejecutan en el entorno de desarrollo RStudio. La metodología que se aplicó en este trabajo se muestra en la Figura 2.1.

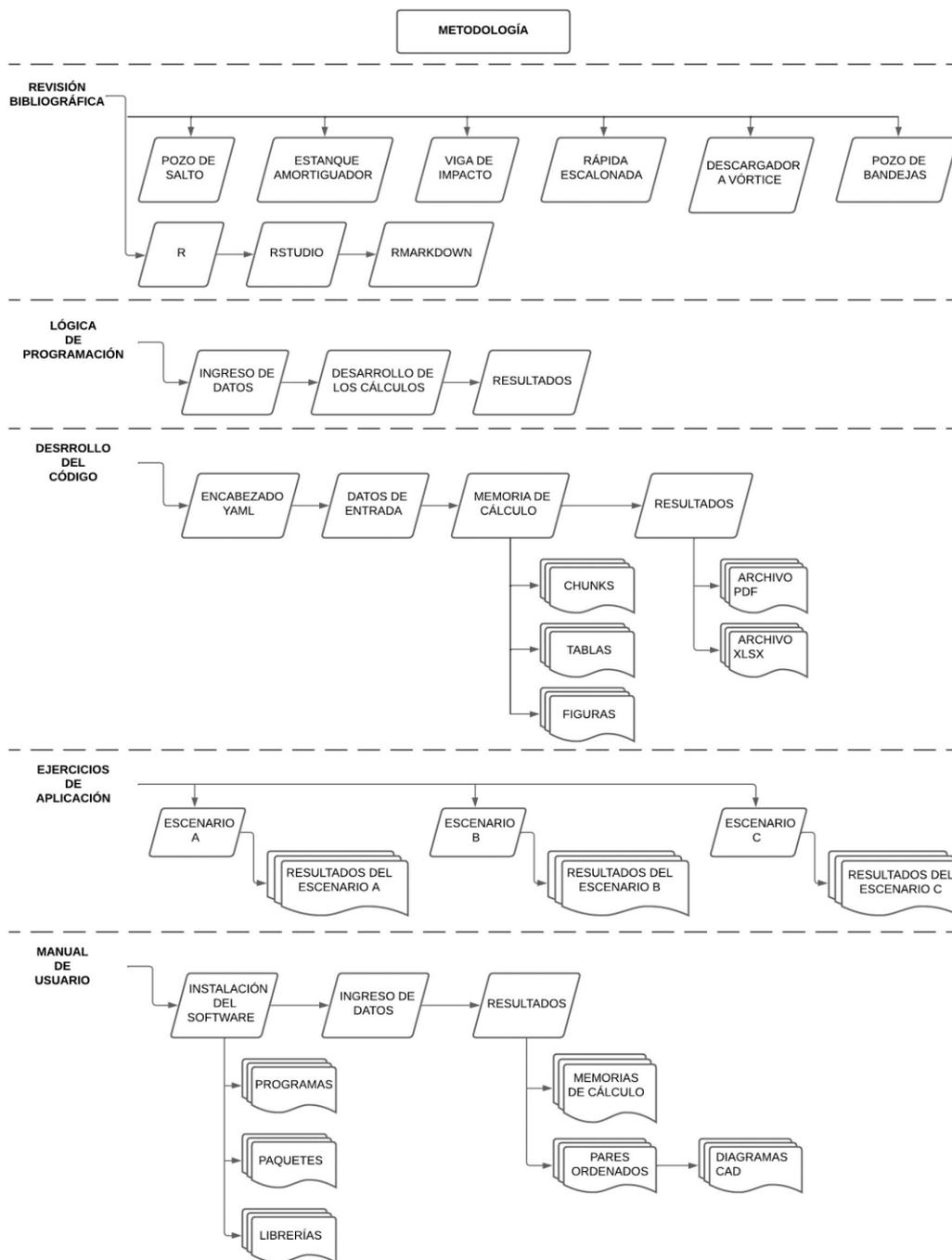


Figura 2.1. Diagrama de la metodología aplicada
Elaborado por: Daniel Campaña E.

2.1 Revisión bibliográfica

La revisión y recopilación bibliográfica se realizó sobre los seis tipos de disipadores de energía propuestos en este trabajo y el programa utilizados para desarrollar la aplicación.

Los documentos consultados contienen la información teórica y técnica de la cual se extrajo las ecuaciones para definir la hidrodinámica del flujo de aproximación. El régimen de flujo y la capacidad de los disipadores permitieron acotar las limitaciones para los parámetros calculados y de esta manera validar los resultados obtenidos.

Las guías de programación de R fueron de gran importancia ya que cuentan con la información básica necesaria para la creación de gráficas, tablas, diagramas y otras opciones que se aplicaron directamente en la aplicación desarrollada.

Se han desarrollado varias librerías para R, que son paquetes computacionales que cumplen determinadas tareas y funciones, entre las cuales se encuentra la librería RMarkdown con la cual se realizaron las memorias de cálculo, ya que permite generar reportes técnicos de manera automática integrando texto plano y lenguaje de programación en un mismo archivo.

2.2 Lógica de programación

La estructura de la lógica de programación con la que se desarrollaron las memorias de cálculo se muestra en la Figura 2.2.

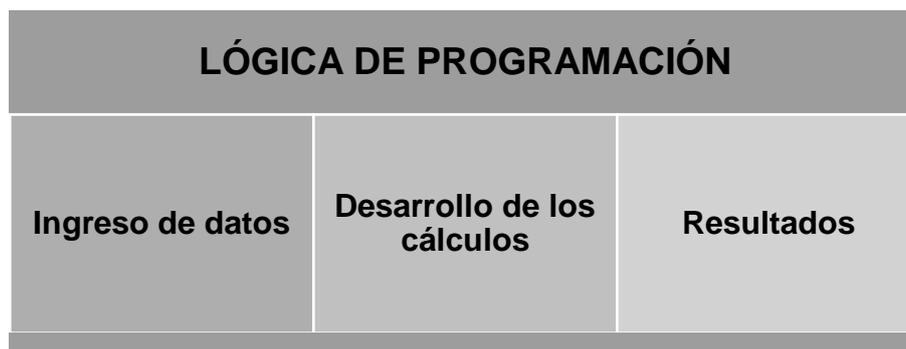


Figura 2.2. Lógica de programación
Elaborado por: Daniel Campaña E.

Ingreso de datos

En primer lugar, se definió el formato de salida de los documentos finales como PDF y se determinaron los parámetros de salida del documento final como el título, autor, fecha, el tamaño y tipo de letra, entre otros, estos parámetros se encuentran en el encabezado YAML, el cual se ubica al inicio de todas las memorias de cálculo.

Para realizar un correcto ingreso de datos se tuvo que unificar cierta nomenclatura de las variables sobre todo de los datos de entrada con el fin de mantener una misma nomenclatura en lo posible para todos disipadores analizados.

Se planificó que el ingreso de datos sea en la parte superior de las memorias de cálculo, dentro del segundo fragmento de código luego de la sección donde se cargan las librerías (*packages*) con el fin de que sea de fácil acceso para el usuario. Los datos ingresados varían según el tipo de disipador y se muestran las unidades con las cuales deben ser ingresados.

Para que las memorias de cálculo trabajen correctamente no se debe modificar ninguna variable o caracter más que los datos que se encuentran en la sección de datos de entrada.

Desarrollo de los cálculos

Para realizar los cálculos se aplicaron las ecuaciones de la Hidráulica Básica que permiten determinar los parámetros hidrodinámicos del flujo de aproximación para los disipadores. Se tomó en cuenta las condiciones y limitaciones según el tipo de disipador analizado.

Para realizar la validación de los datos de entrada se creó una gráfica de barras que representa el porcentaje de exceso sobre los límites permitidos para dicha variable. De superarse el límite máximo los resultados dejan de ser 100% aceptables, habiendo que rediseñar el disipador o cambio los datos de entrada.

Una vez validados los datos, la aplicación los procesa y realiza los cálculos necesarios para obtener los parámetros necesarios que definen las dimensiones del disipador. Los resultados se muestran en tablas y/o figuras de las dimensiones obtenidas.

Resultados

La importancia de contar con un documento que contenga la información más relevante sobre el dimensionamiento de los disipadores con un formato claro y concreto, fomentó la idea de presentar los resultados en reportes que contienen los datos más importantes acerca del dimensionamiento de cada disipador analizado.

Se aprovechó la herramienta computacional RMarkdown que permite compilar texto, imágenes, tablas y líneas de código de programación en un solo archivo para obtener el producto final en formatos como pdf, docx o html.

Los resultados contemplan una serie de reportes en formato (pdf) que contienen las memorias de cálculo de los disipador y un archivo en formato (xlsx) con los pares ordenados de un esquema básico del disipador. Además, se presenta un manual de usuario donde se indica el proceso de instalación de los programas y el manejo de la aplicación DDissipator v1.0.

2.3 Desarrollo del código en R y RMarkdown

Datos preliminares

Los datos preliminares del código son aquellos que definen las etiquetas del documento y el formato de salida del mismo. Estos datos se ubican al inicio de las memorias de cálculo en el encabezado YAML. Adicionalmente, se cargaron las librerías en el primer fragmento de código que se genera automáticamente al crear un archivo Rmd.

- **Encabezado YAML**

El encabezado YAML está ubicado al inicio de las memorias de cálculo, se utiliza para definir los datos y atributos del documento de salida. Esta sección está limitada por guiones (- - -), contiene parámetros como título, autor, fecha, entre otros, además del formato de salida del producto final.

```
1 - - -
2 title: "Título del archivo"
3 author: "Nombre del autor"
4 date: "Fecha del reporte"
5 output: pdf_document
6 ^ - - -
```

Figura 2.3. Estructura predeterminada del encabezado YAML

Fuente: RStudio 2023.06.2

- **Fragmentos de código (*chunks*)**

Los fragmentos de código o "*chunks*" son secciones dentro del documento RMarkdown, cuya función es procesar y ejecutar las líneas de código que se ubican dentro. Estas secciones están limitadas por tildes invertidas (``). Los fragmentos de código se numeran automáticamente en el orden en que se encuentran dentro del documento, además se debe colocar un nombre único que no se repita para evitar conflictos de programación.

```
21 - ``{r setup, include=FALSE}
22 knitr::opts_chunk$set(echo = TRUE, warning = FALSE, message = FALSE)
23
24 library(rmarkdown)
25 library(knitr)
26 library(ggplot2)
27 library(gridExtra)
28 library(magick)
29 library(rio)
30
31 ^ ``
```

Figura 2.4. Fragmento de código predeterminado - Chunk 1: setup

Fuente: RStudio 2023.06.2

Desde la línea 21 hasta la 31 se encuentra el **Chunk 1: setup**, que es el fragmento de código creado por defecto cuando se genera un nuevo documento RMarkdown. Es una sección que no se debe modificar, sin embargo, se puede utilizar para cargar todas las librerías utilizadas en el documento actual como se muestra en la Figura 2.4. Cabe mencionar que las librerías cargadas en el (setup) son específicamente para este trabajo de titulación.

Datos de entrada

Desde la línea 34 del código de los disipadores se encuentra los datos de entrada con el nombre **Chunk 2: datos-entrada**, son los valores ingresados por el usuario para calcular las dimensiones del disipador analizado. Las variables se muestran con sus respectivas unidades seguido de un comentario que indica el nombre de cada variable y/o alguna observación importante.

Las opciones del chunk están asignadas para que evalúe las líneas de código pero que no las muestre ni las imprima en el documento final.

Memorias de cálculo

➤ Estructura de las memorias

El primer capítulo de las memorias de cálculo corresponde a la introducción, empieza con el comentario **<!-- Capítulo 1 -->**. Se mantuvo la misma estructura para todas las memorias de cálculo y se dividió en cinco capítulos como se muestra en la Figura 2.5.

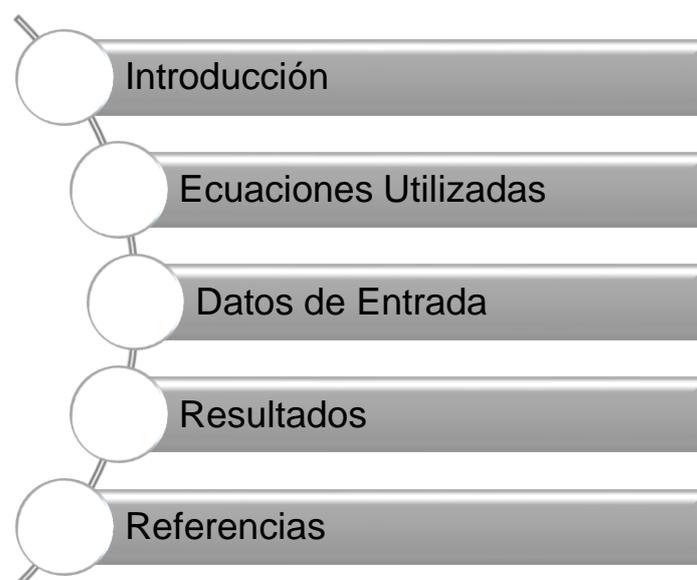


Figura 2.5. Estructura de las memorias de cálculo
Elaborado por: Daniel Campaña E.

➤ Elementos de las memorias

La ventaja de usar RMarkdown para elaborar informes técnicos es la versatilidad que existe al complementar texto narrativo con líneas de código de R en un solo archivo. El texto narrativo es el cuerpo de las memorias de cálculo, mientras que las líneas de código son los chunks o fragmentos en donde se procesan y ejecutan las variables a partir de los datos de entrada.

▪ Texto narrativo

Es la redacción del documento escrita en RMarkdown que es un lenguaje de marcado ligero fácil de entender y de escribir. Utiliza símbolos sencillos para marcar el texto y etiquetar las referencias como se describe en el Anexo V.

▪ Fragmentos de código

Son fragmentos de código que van intercalados en el texto narrativo. Contienen variables y las instrucciones en lenguaje de programación R. Los fragmentos de código se definieron en función de su tipo de contenido por ejemplo de datos, de cálculos, de tablas, de figuras, entre otros. En la Figura 2.6, se muestran los elementos que conforman a un fragmento de código o chunk.

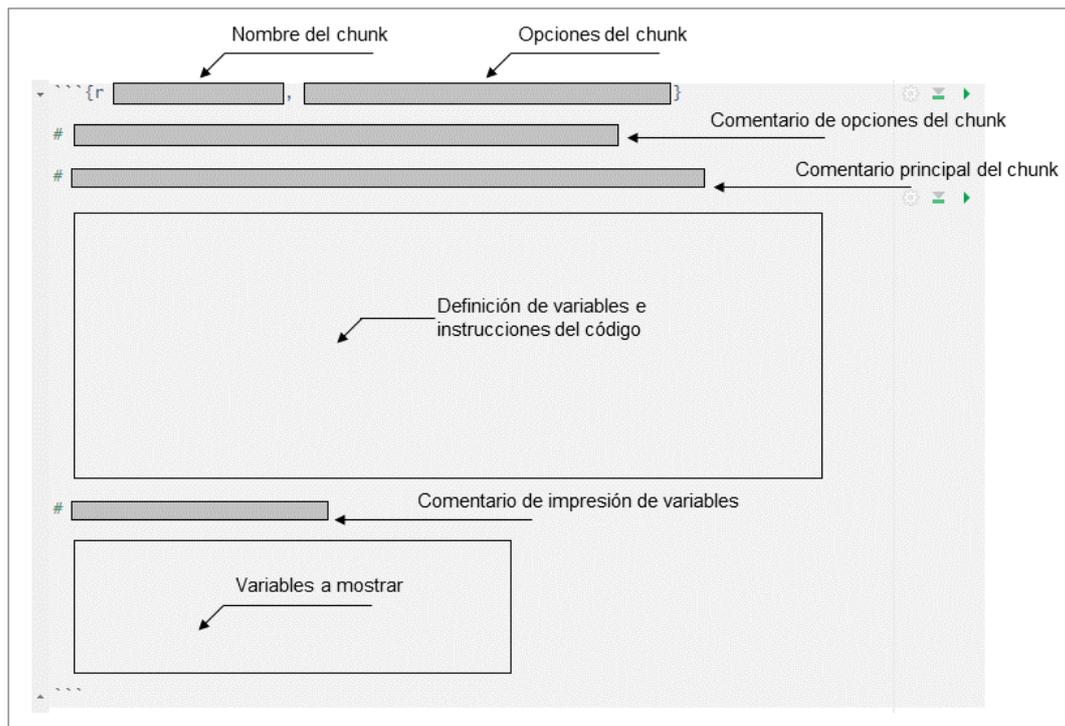


Figura 2.6. Estructura general de los fragmentos de código (chunks)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

- **Nombre del fragmento de código**

El nombre del chunk identifica a cada fragmento de código dentro del documento, por lo que los nombres no pueden repetirse. Los nombres hacen referencia al contenido de mismo y al tipo de argumento de salida por ejemplo tabla o figura y su ubicación dentro del código.

Nota: La numeración de los chunks no necesariamente coincide con la numeración de tablas y figuras del producto final.

- **Opciones de los fragmentos de código**

Estas opciones van luego del nombre del chunk separados por una coma “,”. Existen varias opciones, pero las tres principales que permiten llevar de manera eficiente el manejo del código son echo, include, eval.

- a) **echo:** imprime las líneas de código en el documento final.
- b) **include:** muestra los resultados a imprimir tanto en el documento final como en la interfaz gráfica.
- c) **eval:** lee y ejecuta las instrucciones del código que se encuentran en ese chunk.

Nota: La instrucción se ejecuta dependiendo si estos comandos se encuentran seguidos de TRUE/FALSE.

- **Comentarios del chunk**

El comentario de las opciones del chunk es un recordatorio del proceso que realizan los comandos de las opciones del chunk. El comentario de impresión de variables indica el fin de las instrucciones del código y el inicio de las variables a imprimir.

- **Instrucciones del código**

En esta sección mostrada en la Figura 2.6, se definieron las variables y las instrucciones del código. Las líneas de programación se ejecutan para compilar toda la información generada, entre gráficas, tablas y texto dentro de un documento de salida el cual puede tener diversos formatos.

2.4 Ejercicios de aplicación

Se proponen varios escenarios para probar la funcionalidad de las memorias de cálculo. Los escenarios se propusieron en función de la ubicación del disipador dentro de la red de tuberías y de la forma de la sección transversal del conducto de aproximación. La configuración de los escenarios propuestos se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Escenarios según el tipo de dissipador

DISIPADOR DE ENERGÍA	CONDUCTO DE APROXIMACIÓN	DISIPADOR DE LÍNEA	DISIPADOR DE FIN DE LÍNEA	ESCENARIO
Pozo de salto		✓		A
Estanque amortiguador			✓	B
Viga de impacto		✓		A
Rápida escalonada			✓	B
Descargador a vórtice		✓		C
Pozo de bandejas		✓		C

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Escenario A

Para el escenario “A” se consideró un pozo dentro de la red de alcantarillado el cual tiene una tubería de entrada de hormigón de sección circular como conducto de aproximación y se debe sortear una altura de 1.2 m. Los datos de entrada se aplicaron a los dissipadores de línea con pozo de salto y viga de impacto. En la Tabla 2.2 se muestran los datos de entrada aplicados en este escenario.

Tabla 2.2. Datos de entrada - Escenario “A”

Variable	Símbolo	Unidad	Pozo de salto	Viga de impacto
Caudal de diseño	Q_d	(m ³ /s)	1.85	1.85
Diámetro de la tubería	D_0	(m)	0.90	0.90
Diámetro del pozo	D_s	(m)	1.00	
Pendiente longitudinal	S_0	(m/m)	0.01	0.01
Desnivel entre colectores	H_s	(m)	1.20	1.20
Rugosidad absoluta	e	(mm)	0.002	0.002

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Escenario B

Para el escenario “B” se consideró que la ubicación de las estructuras de disipación de energía es en la descarga del colector y se debe sortear una altura de 50m. El colector de descarga es de sección rectangular con un ancho de 2.80 m. Los datos de este escenario se aplicaron a los dissipadores de fin de línea con estanque amortiguador y rápida de fondo escalonado y se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Datos de entrada - Escenario “B”

Variable	Símbolo	Unidad	Estanque amortiguador	Rápida escalonada
Caudal de diseño	Q_d	(m ³ /s)	35.0	35.0
Ancho del conducto	b_0	(m)	2.80	2.80
Pendiente del terreno	S_1	(m/m)	1.20	1.20
Desnivel entre colectores	H_s	(m)	16.50	16.50
Altura del flujo en el canal de aproximación	y_0	(m)	2.43	
Calado en el canal de salida	y_3	(m)	2.0	
Altura de la contrahuella	h	(m)		1.0

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Escenario C

En el escenario “C” se considera un pozo intermedio en la red de tuberías, el cual tiene una altura entre colectores de 7 m. La sección del pozo puede ser circular o rectangular, los datos de entrada se aplicaron a los disipadores de línea con descargador a vórtice y con pozo de bandejas los cuales tienen un con conducto de aproximación de sección rectangular. Los datos de entrada en este escenario se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Datos de entrada - Escenario “C”

Variable	Símbolo	Unidad	Descargador a Vórtice	Pozo de bandejas
Caudal de diseño	Q_d	(m ³ /s)	0.80	0.80
Ancho del conducto	b_0	(m)	0.85	0.85
Pendiente longitudinal	S_0	(m/m)	0.005	0.005
Desnivel entre colectores	H_s	(m)	7.0	7.0
Coefficiente de Manning	n_0	(-)	0.015	0.015
Radio de curvatura de la entrada al pozo vertical	ΔR	(m)	0.02	
Dimensión constructiva	c_{sb}	(m)	0.02	
Dimensión constructiva	s	(m)	0.02	

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Nota: La ubicación de las dimensiones constructivas se pueden ver en el Anexo IV.

2.5 Manual de usuario

El manual de usuario de la aplicación **DDissipator v1.0**, es una guía que muestra la forma correcta de descargar e instalar el lenguaje de programación R, el entorno de desarrollo RStudio y las librerías necesarias para ejecutar la aplicación.

Se realizó una comprobación entre las versiones de los programas utilizados para seleccionar las versiones estables en la programación de la aplicación. Los paquetes computacionales muchas veces trabajan con revisiones específicas para cierta versión del programa principal por lo que fue necesario trabajar con paquetes cuyo número de revisión fueran compatibles con el programa principal R.

Se recopilaron los instaladores mediante enlaces de las páginas oficiales para contar con un respaldo de las versiones de los programas utilizadas en este trabajo.

El manual de usuario muestra el uso correcto para ejecutar la aplicación DDissipator v1.0, los pasos a seguir para la obtención de los resultados se presentan en el segundo capítulo del manual.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

La aplicación DDissipator v1.0 desarrollada en el lenguaje de programación R en su primera versión se conformó por seis memorias de cálculo de distintos disipadores de energía hidráulica. Los archivos de las memorias de cálculo tienen formato (*Rmd*) y se ejecutaron con los datos de entrada de los escenarios propuestos en la Sección 2.4, cada memoria generó un reporte en formato (*pdf*) y una hoja de cálculo en formato (*xlsx*).

Los escenarios propuestos se dividieron según el tipo de disipador y la geometría del colector de aproximación; cuatro escenarios para los disipadores de línea y dos escenarios para los disipadores de fin de línea como se mostró en la Tabla 2.1. Los datos de entrada se ingresaron en cada memoria de cálculo para obtener los reportes finales y los archivos adjuntos.

Revisión de las referencias bibliográficas

Se realizó una consulta y recopilación bibliográfica del diseño y dimensionamiento de los disipadores de energía propuestos en este trabajo. Los documentos revisados abarcan cinco documentos técnicos, siete libros, una norma técnica, una monografía, un trabajo de titulación, cinco tesis de grado y una tesis de maestría. Estos documentos se encuentran referenciados en el Capítulo 4 de referencias bibliográficas de este trabajo de integración curricular.

Se utilizaron las guías de programación (*cheat sheets*) proporcionadas por el entorno de desarrollo RStudio ya que presentan una ayuda importante en el momento de trabajar con programación en R. Estas guías se las puede encontrar desde la barra de menú en la opción “*Help*” y luego seleccionando la opción “*Cheat sheets*”, aquí se encuentran varias guías para diferentes temáticas dentro de RStudio.

Aplicación desarrollada

La aplicación DDissipator v1.0 tiene seis componentes entre ejecutables y resultados, que son indispensables para su funcionamiento. Los archivos están ubicados dentro de la carpeta del proyecto “DDISSIPATOR” en el subdirectorio “**Aplicación_DD**”.

Los archivos de la aplicación se encuentran en el anexo digital del siguiente enlace:

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:f/g/personal/daniel_campana_epn_edu_ec/EvGtSs1XDL1KtRVYW2i7-kUBK45gOii-jrEtUEsJKZrdA?e=fdmSz2

Los archivos que conforman la aplicación se enumeran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Listado de archivos de la aplicación desarrollada

NOMBRE DEL ARCHIVO	EXTENSIÓN	DESCRIPCIÓN
DDISSIPATOR	Rproj	Archivo de apertura del proyecto
Pozo_Salto	Rmd / pdf	Memoria de cálculo y reporte del disipador de energía con pozo de salto
Estanque_Amortiguador	Rmd / pdf	Memoria de cálculo y reporte del disipador de energía con estanque amortiguador
Viga_Impacto	Rmd / pdf	Memoria de cálculo y reporte del disipador de energía con viga de impacto
Rapida_Escalonada	Rmd / pdf	Memoria de cálculo y reporte del disipador de energía con rápida de fondo escalonado
Descargador_Vortice	Rmd / pdf	Memoria de cálculo y reporte del disipador de energía con descargador a vórtice
Pozo_Bandejas	Rmd / pdf	Memoria de cálculo y reporte del disipador de energía con pozo de bandejas
Figuras_DD	-	Carpeta con las figuras utilizadas en las memorias de cálculo
Bibliografia_DD	bib	Bibliografía referenciada en las memorias de cálculo
Apa_7ma	csf	Formato de las referencias bibliográficas de las memorias de cálculo
Salto_cad	xlsx	Pares ordenados del esquema del pozo de salto
Viga_cad	xlsx	Pares ordenados del esquema de la viga de impacto
Rapida_cad	xlsx	Pares ordenados del esquema de la rápida escalonada
Vortice_cad	xlsx	Pares ordenados del esquema del descargador a vórtice
Bandejas_cad	xlsx	Pares ordenados del esquema del pozo de bandejas

Elaborado por: Daniel Campaña E.

- **Memorias de cálculo**

La programación de la aplicación DDissipator v1.0 se la realizó en su totalidad dentro de las memorias de cálculo. Las memorias de cálculo combinan texto narrativo con fragmentos de código, cabe mencionar que RMarkdown reconoce a cada párrafo del texto narrativo como una sola línea de código dentro del archivo (Rmd).

Cada memoria de cálculo que conforma la aplicación se divide en secciones que tienen un diferente número de líneas de código en cada uno de sus componentes, tal como se muestra en la Tabla 3.2. Las seis memorias de cálculo forman parte de una sola aplicación con 5379 líneas de código, sin embargo, en esta versión son independientes una de otra y se las puede ejecutar por separado.

Tabla 3.2. Configuración de memorias de cálculo por número de línea de código

No.	Disipador de energía	Yaml	Setup	Ingreso de datos	Introducción	Ecuaciones utilizadas	Datos de entrada	Resultados
1	Pozo de salto	1 - 20	21 - 33	34 - 75	76 - 106	107 - 191	192 - 264	265 - 671
2	Estanque amortiguador	1 - 20	21 - 33	34 - 72	73 - 101	102 - 217	218 - 285	286 - 727
3	Viga de impacto	1 - 20	21 - 33	34 - 74	75 - 105	106 - 230	231 - 300	301 - 1252
4	Rápida escalonada	1 - 20	21 - 33	34 - 72	73 - 111	112 - 238	239 - 310	311 - 704
5	Descargador a vórtice	1 - 20	21 - 33	34 - 73	74 - 129	130 - 303	304 - 464	375 - 1210
6	Pozo de bandejas	1 - 20	21 - 33	34 - 65	66 - 105	106 - 281	282 - 353	354 - 815

Elaborado por: Daniel Campaña E.

- **Reportes en PDF**

Los reportes de los disipadores de energía son el producto que se obtiene al compilar las líneas de programación. Estos reportes contienen el análisis y el dimensionamiento de los disipadores, tienen el mismo nombre que las memorias de cálculo, pero con extensión (pdf).

En los reportes se encuentra una introducción sobre el disipador seguido de las ecuaciones más importantes utilizadas para determinar los parámetros hidráulicos. Los datos ingresados y los valores calculados se presentan en tablas y figuras que permiten tener una mayor comprensión sobre las variables. Los reportes de los disipadores se muestran en el Anexo I.

▪ Archivos de referencias

Para realizar citas y colocar referencias en las memorias de cálculo fue necesario dos tipos de archivos. El primero contiene todas las referencias utilizadas en las memorias de cálculo en formato (**bib**), el cual guarda la bibliografía en formato (*Bibtex*). De este archivo se lee la información de las citas bibliográficas y las referencias de la parte final del documento.

El segundo archivo contiene el formato de las citas y las referencias bibliográficas. Este archivo tiene extensión (**csl**) y no requiere modificación. Los archivos (.bib) y (.csl) deben estar guardados en la carpeta de la aplicación y se ejecutan automáticamente desde el Yaml.

Ejercicios de aplicación

Los resultados obtenidos de los escenarios propuestos contemplan la caracterización del flujo de aproximación y el dimensionamiento de cada estructura.

➤ Resultados del escenario A

Los disipadores de línea propuestos en el escenario “A” son:

- ✓ Disipador con pozo de salto
- ✓ Disipador con viga de impacto

El detalle de los cálculos para los disipadores del escenario “A” se muestran en el Anexo I. A continuación, se presenta el resumen de los resultados.

▪ Características del flujo de aproximación

El colector de aproximación del escenario “A” tiene una sección transversal tipo tubería circular de hormigón. Las características del flujo calculadas en la tubería de entrada se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Hidrodinámica del flujo de aproximación - Escenario “A”

VARIABLE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	1.85	(m ³ /s)
Diámetro de la tubería	D_0	0.90	(m)
Altura de caída	H_s	1.20	(m)
Calado del flujo	y_0	0.54	(m)
Velocidad media	V_0	4.60	(m/s)
Número de Froude	Fr_0	2.18	(-)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Se obtuvo un número de Froude $Fr_0 = 2.18$ por lo que se considera flujo supercrítico.

- **Dimensionamiento de las estructuras**

Las dimensiones obtenidas para el pozo de salto se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Dimensiones del pozo de salto.

VARIABLE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del pozo	D_s	1.0	(m)
Desnivel entre colectores	H_s	1.20	(m)
Diámetro del colector de entrada	D_0	0.90	(m)
Diámetro de la tubería de salida	D_2	0.90	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 3.1, se muestra un esquema del dimensionamiento del pozo de salto.

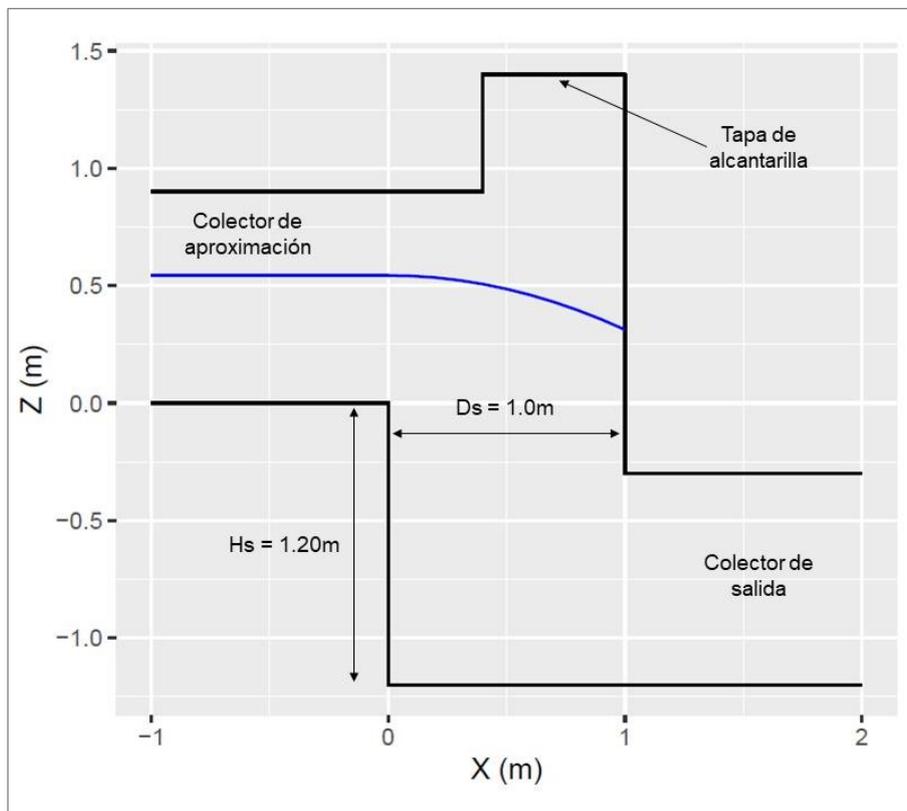


Figura 3.1. Vista en elevación del pozo de salto

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Las dimensiones de la viga de impacto se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Dimensiones de la viga de impacto

VARIABLE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Altura de la cámara	Z	2.65	(m)
Altura de la parte vertical de la viga	b	0.94	(m)
Altura desde el piso de la cámara a la viga	k	0.42	(m)
Espesor de la viga	m	0.21	(m)
Longitud de la tubería de ingreso hasta la viga	L1	1.25	(m)
Longitud total de la cámara de disipación	L	3.30	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 3.2 se muestra un esquema de la vista en elevación de la viga de impacto.

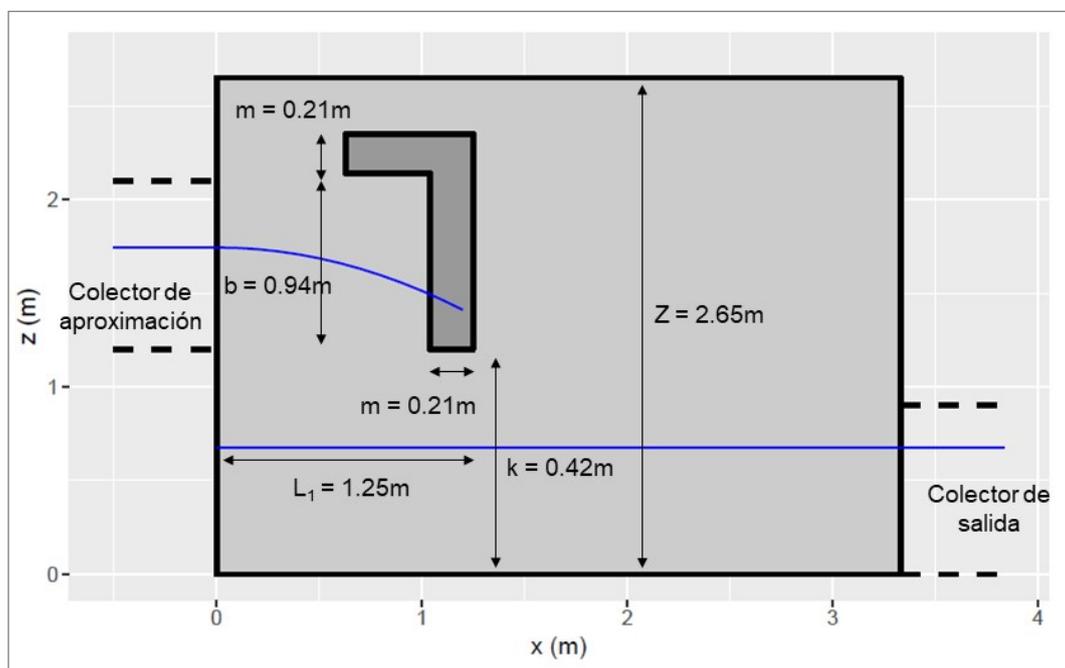


Figura 3.2. Esquema en elevación del disipador con viga de impacto

Elaborado por: Daniel Campaña E.

▪ **Análisis de resultados del escenario “A”**

El pozo de salto según el número de impacto calculado, igual a dos, indica que el chorro de agua impacta con la pared del pozo produciéndose una moderada pérdida de energía. Para garantizar que el conducto de salida esté bajo régimen de superficie libre se recomienda colocar una pantalla para generar una adecuada circulación de aire sobre el flujo de salida.

La viga de impacto funciona de forma adecuada debido a que el chorro de agua impacta directamente en el deflector. La longitud del disipador es de 3.3 m, esta longitud es más de tres veces el ancho del pozo por lo que uno de los requisitos para realizar el diseño definitivo de este disipador es comprobar la disponibilidad de espacio.

▪ **Matriz comparativa para seleccionar el mejor disipador**

Se realizó una comparación relativa entre los disipadores con pozo de salto y con viga de impacto. Se utilizaron criterios de construcción, costos, eficiencia y mantenimiento para determinar la mejor opción de las dos presentadas. Las calificaciones asignadas para la matriz comparativa son: un valor de 5 para indicar que el criterio es aceptable o no existe grandes inconvenientes, 3 para indicar que el criterio tiene un moderado grado de dificultad o requiere cierta atención especial y un valor de 1 para los criterios que presenten una mayor dificultad en su ejecución o no sean del todo favorables.

Tabla 3.6. Matriz comparativa - Escenario "A"

Criterio	Pozo de salto	Viga de impacto
Dimensiones de la estructura	5	3
Facilidad constructiva	5	3
Factibilidad económica	5	3
Disipación de energía	1	5
Requisitos de mantenimiento	5	3
Total	21	17

Aceptable 5 Regular 3 Mala 1

Elaborado por: Daniel Campaña E.

De acuerdo con la matriz comparativa de la Tabla 3.6, entre los disipadores con pozo de salto y viga de impacto; el pozo de salto por su facilidad constructiva y mantenimiento es la elección más razonable siempre y cuando no exista un aumento considerable del caudal de diseño lo que podría comprometer la eficiencia de este disipador.

Se puede considerar la utilización del disipador con viga de impacto si existe disponibilidad de espacio y se prioriza la eficiencia en disipación de energía ya que, aunque este disipador obtuvo una menor calificación, los criterios no difieren sustancialmente.

➤ **Resultados del escenario B**

Los disipadores de fin de línea propuestos en el escenario “B” son:

- ✓ Disipador con estanque amortiguador
- ✓ Disipador con rápida de fondo escalonado

Los resultados completos de estos disipadores se encuentran en los reportes en PDF del Anexo I. A continuación, se muestra el resumen de los resultados del escenario “B”.

▪ **Dimensionamiento de las estructuras**

Para el cálculo del estanque amortiguador al pie de la rápida con una carga de agua sobre el punto más alto del canal de aproximación de 2.43 m, se obtuvo un número de Froude de $Fr=7.85$, por lo que se genera un resalto hidráulico estable. Además, se estimó la velocidad al pie de la rápida igual a $V_1 = 19.6$ m/s por lo que se recomienda un estanque USBR tipo II. Las dimensiones del estanque amortiguador se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Dimensionamiento del estanque amortiguador

VARIABLE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Altura del diente deflector	h_1	0.60	(m)
Ancho del diente deflector	w_1	0.60	(m)
Separación entre dientes	s_1	0.60	(m)
Distancia diente-muro	c_1	0.30	(m)
Altura del umbral dentado	h_2	1.40	(m)
Ancho del diente del umbral	w_2	1.0	(m)
Separación de dientes del umbral	s_2	1.0	(m)
Ancho de la cresta del umbral	c_2	0.10	(m)
Longitud del estanque	L_2	28.5	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 3.3 se muestran un esquema de la vista en elevación del estanque amortiguador. Donde las figuras representan:

- a) Dimensiones de los dientes deflectores al inicio del estanque
- b) Dimensiones de los dientes deflectores del umbral terminal dentado
- c) Perfil del fondo del estanque amortiguador.

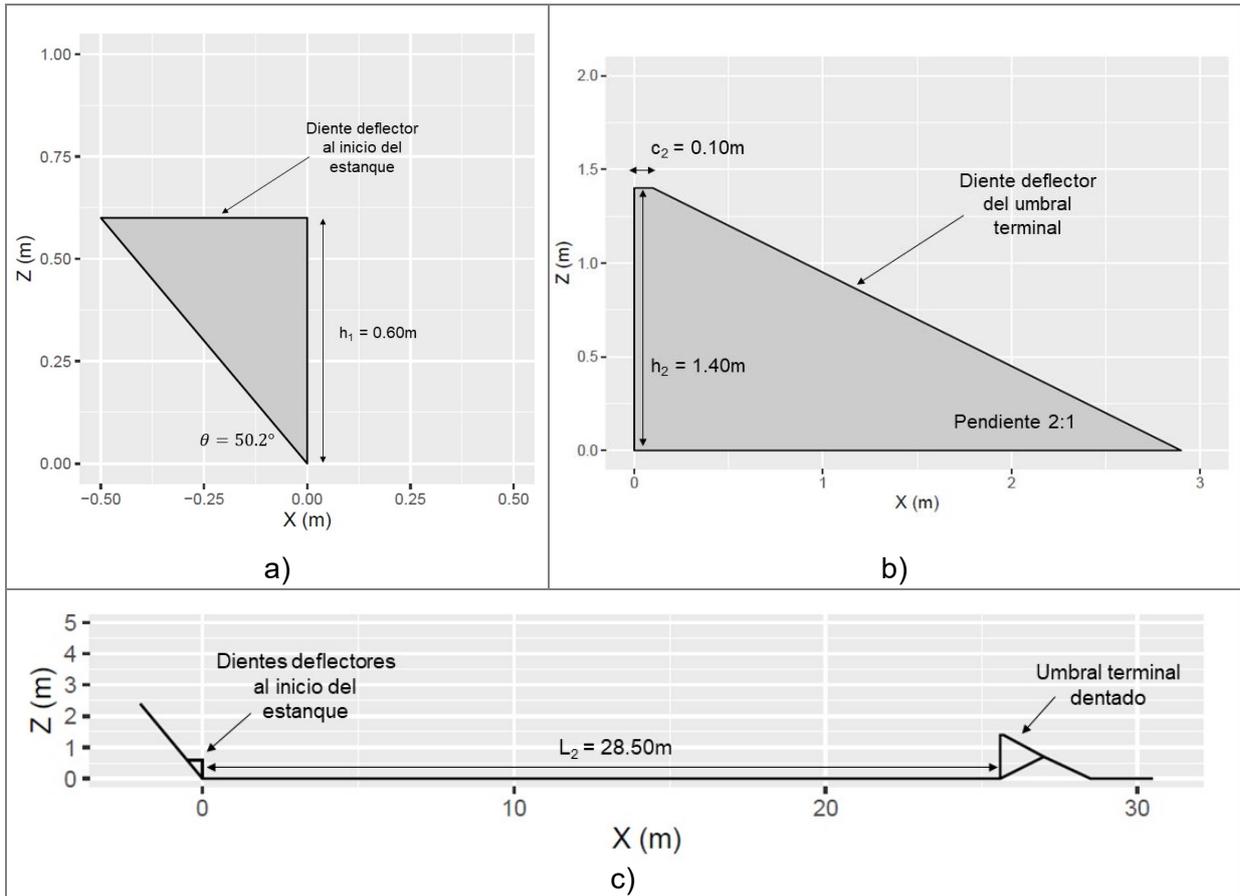


Figura 3.3. Vista en elevación del estanque amortiguador
Elaborado por: Daniel Campaña E.

El ángulo de inclinación del terreno de 50.2° es menor al ángulo máximo de 55° recomendado para el dissipador con rápida escalonada. A partir del valor de la contrahuella y del ángulo de la rápida se estimó una longitud de huella de $l = 0.8\text{ m}$. Se estimaron un total de 16 escalones cuya relación de aspecto se muestra en la Figura 3.4.

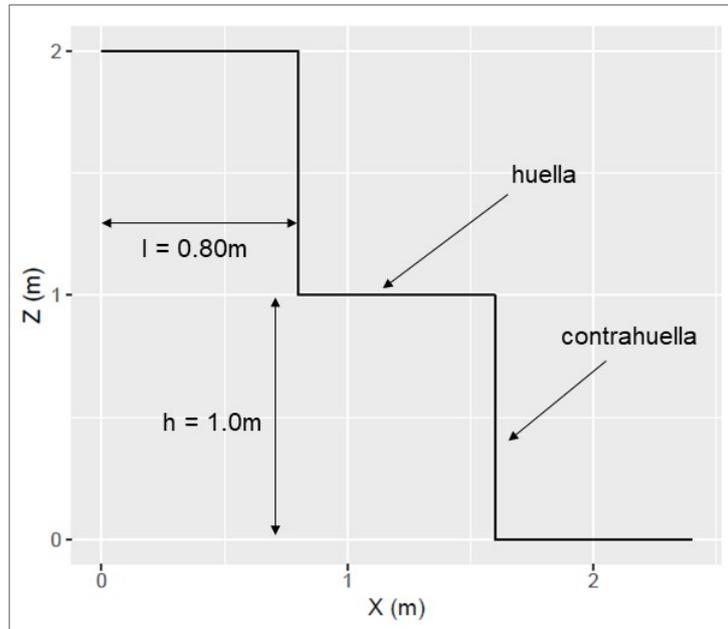


Figura 3.4. Relación de aspecto de los escalones de la rápida
Elaborado por: Daniel Campaña E.

Se obtuvo un valor de $y_c/h = 2.25$, el cual se encuentra sobre el límite inferior para flujo rasante lo que indica que sobre la rápida circula un flujo rasante (*FRAS*).

- **Análisis de resultados del escenario “B”**

Se obtuvo un número de Froude $Fr = 7.85$ al pie de la rápida y una velocidad de $V = 19.6$ m/s, por lo que se utilizó un estanque USBR tipo II con dientes deflectores y un umbral terminal dentado. No se utiliza otro tipo de accesorio como dados amortiguadores debido a las altas velocidades que podrían generar cavitación en dichos accesorios. La utilización de este estanque reduce alrededor de un 50% la longitud de la solera, por lo que es conveniente si el espacio es una limitante.

Para sortear el desnivel de 16 m y una inclinación de 50.2° se requieren 16 escalones de 0.80×1.0 m. Esta opción es factible debido a la facilidad constructiva y al hecho de que al mantener al pendiente del terreno como pendiente de diseño no se incurre en gastos de excavación.

- **Matriz comparativa para seleccionar el mejor disipador**

La comparación relativa entre los disipadores con estanque amortiguador y con rápida de fondo escalonado utiliza criterios de construcción, costos, eficiencia y mantenimiento para determinar la mejor opción de las dos presentadas. Las calificaciones asignadas para la matriz comparativa son: un valor de 5 para indicar que el criterio es aceptable o no existe grandes inconvenientes, 3 para indicar que el criterio tiene un moderado grado de dificultad o

requiere cierta atención especial y un valor de 1 para los criterios que presenten una mayor dificultad en su ejecución o no sean del todo favorables.

Tabla 3.8. Matriz comparativa - Escenario “B”

Criterio	Estanque amortiguador	Rápida escalonada
Dimensiones de la estructura	1	3
Facilidad constructiva	3	5
Factibilidad económica	1	3
Disipación de energía	3	5
Requisitos de mantenimiento	3	5
Total	11	21

Acceptable **5** Regular **3** Mala **1**

Elaborado por: Daniel Campaña E.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 3.8, de la matriz comparativa del escenario “B”, se puede observar que existe una gran diferencia en la calificación de los criterios para cada disipador. Al ser disipadores que sirven para sortear grandes alturas sus dimensiones son considerables. Sin embargo, hay que tener en cuenta el lugar donde ocurre la disipación de energía, mientras que el estanque amortiguador disipa la energía desde el pie de la rápida al formarse el resalto hidráulico hasta una longitud de 28.5 m, la rápida escalonada disipa la energía a lo largo de toda la inclinación del terreno (21.5 m aproximadamente), esto se traduce a una reducción de espacio y dimensiones constructivas mucho menores al optar por la construcción de la rápida escalonada.

➤ **Resultados del escenario C**

Los disipadores de línea propuestos en el escenario “C” son:

- ✓ Disipador con pozo de bandejas
- ✓ Disipador con descargador a vórtice

El detalle de los cálculos de los disipadores del escenario “C” se encuentra en el Anexo I. El resumen de los cálculos se muestra a continuación.

- **Características del flujo de aproximación**

EL colector de aproximación propuesto en el escenario “C” tiene una sección transversal tipo canal rectangular de hormigón. Las características hidrodinámicas del flujo en el canal de entrada se muestran en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Hidrodinámica del flujo de aproximación - Escenario “C”

VARIABLE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	0.80	(m ³ /s)
Ancho del canal	b_0	0.85	(m)
Altura de caída	H_s	7.0	(m)
Calado del flujo	y_0	0.52	(m)
Velocidad media	V_0	1.79	(m/s)
Número de Froude	Fr_0	0.79	(-)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

El número de Froude es $Fr = 0.79$, por lo tanto, se considera flujo subcrítico en el conducto de aproximación. Al cumplirse la condición de régimen subcrítico se procedió con el dimensionamiento del pozo de bandejas para flujo subcrítico.

- **Dimensiones de las estructuras**

El dimensionamiento del descargador a vórtice se lo realizó a partir del tipo de régimen subcrítico del flujo de aproximación. Los valores calculados se muestran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Valores calculados de la cámara de entrada

VARIABLE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Ancho del canal de aproximación	b_0	0.85	(m)
Diámetro del pozo vertical	D_s	0.70	(m)
Radio 1 de la cámara	R_1	1.11	(m)
Radio 2 de la cámara	R_2	0.87	(m)
Radio 3 de la cámara	R_3	0.63	(m)
Radio 4 de la cámara	R_4	0.51	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 3.5, se muestra un esquema de la vista en planta de la cámara de entrada del descargador a vórtice para flujo subcrítico.

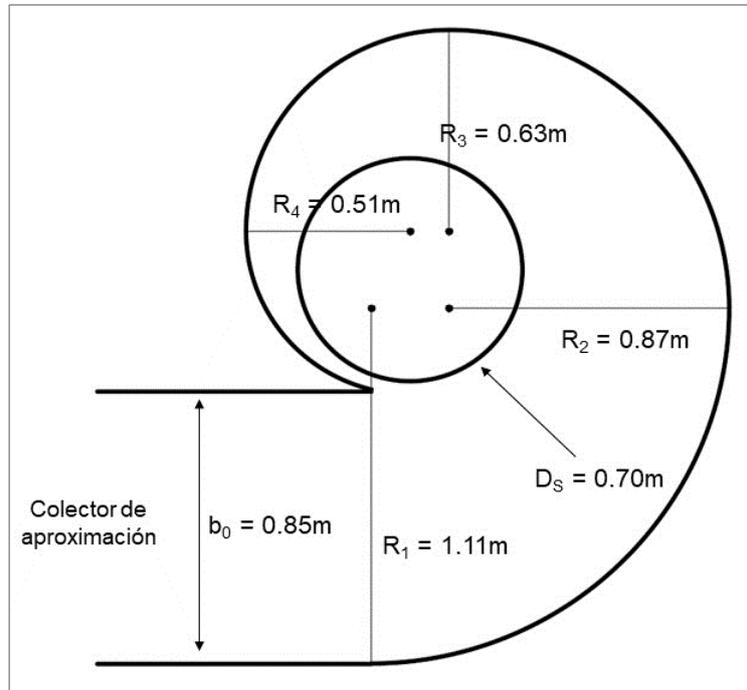


Figura 3.5. Vista en elevación de la cámara de entrada del descargador a vórtice
Elaborado por: Daniel Campaña E.

Para el pozo de bandejas que trabaja bajo el régimen de flujo subcrítico se obtuvieron un total de cuatro bandejas contando la primera que es la continuación del canal. Se cumple la condición de que la última bandeja debe descargar el flujo en la parte posterior de la cámara de disipación. Las bandejas tienen una inclinación del 5%.

Tabla 3.11. Valores calculados del pozo de bandejas

VARIABLE	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Número de bandejas	N	4	(#)
Desnivel entre colectores	H_s	7.0	(m)
Separación de bandejas	H	1.60	(m)
Longitud de bandejas	L	1.70	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Un esquema de la vista en elevación del pozo se muestra en la Figura 3.6. Esta figura representa los pares ordenados del pozo de bandejas exportados como (xlsx), se muestra la dirección del flujo y la inclinación de las bandejas a partir de la segunda.

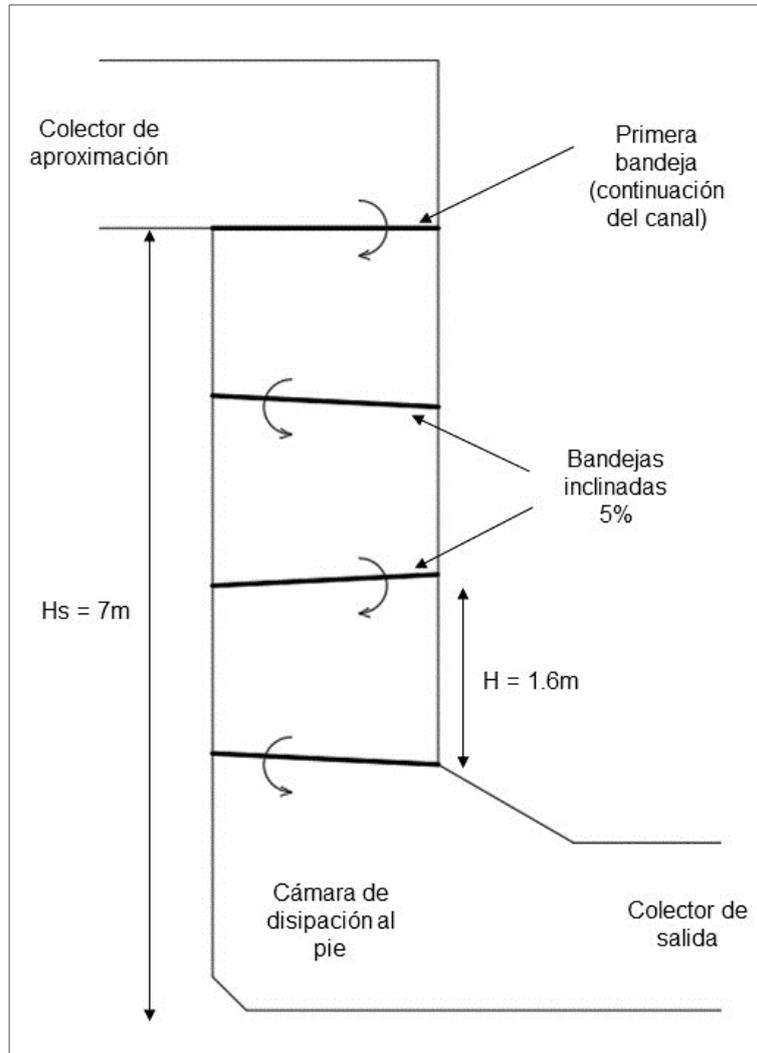


Figura 3.6. Esquema de la vista en elevación del pozo de bandejas
Elaborado por: Daniel Campaña E.

- **Matriz comparativa para seleccionar el mejor disipador**

Se realizó una comparación relativa entre los disipadores con descargador a vórtice y con pozo de bandejas. Se utilizaron criterios de construcción, costos, eficiencia y mantenimiento para determinar la mejor opción de las dos presentadas. Las calificaciones asignadas para la matriz comparativa son: un valor de 5 para indicar que el criterio es aceptable o no existe grandes inconvenientes, 3 para indicar que el criterio tiene un moderado grado de dificultad o requiere cierta atención especial y un valor de 1 para los criterios que presenten una mayor dificultad en su ejecución o no sean del todo favorables.

La matriz comparativa del escenario "C" se muestra en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Matriz comparativa - Escenario “C”

Criterio	Descargador a vórtice	Pozo de bandejas
Dimensiones de la estructura	3	5
Facilidad constructiva	3	5
Factibilidad económica	3	5
Disipación de energía	5	3
Requisitos de mantenimiento	5	1
Total	19	19

Aceptable 5 Regular 3 Mala 1

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Según la matriz comparativa entre los disipadores el escenario “C” donde se consideró flujo subcrítico se obtuvo un resultado similar. Ambos disipadores tienen buenas características tanto constructivas como económicas, sin embargo, por disipación si se considera mantener la eficiencia hidráulica se recomienda el disipador de energía con descargador a vórtice debido que no requiere mantenimiento a comparación del pozo de pozo de bandejas cuyo mantenimiento debe ser constante.

Cabe recalcar que si se obtiene flujo supercrítico no es recomendable la utilización del pozo de bandejas. Si el descargador a vórtice trabaja con flujo supercrítico se debe realizar un nuevo dimensionamiento para obtener una nueva geometría del disipador.

Manual de usuario

El manual de usuario de la aplicación **DDissipator v1.0**, contiene una guía para instalar los programas y paquetes computacionales y detalla el funcionamiento de la aplicación desde el ingreso de datos hasta la obtención de resultados.

En el primer capítulo se describen los pasos a seguir para realizar una correcta y ordenada instalación de los programas y los paquetes computacionales necesarios para ejecutar la aplicación. También se señalan las versiones correspondientes de los programas para que la aplicación funcione de forma adecuada. Se sugiere dos tipos de instalación, el primer tipo de instalación desde cero sin ningún programa instalado previamente y el segundo tipo con parte de los programas previamente instalados.

El subdirectorio “**Programas_R**” contiene los instaladores de los programas y paquetes requeridos para ejecutar la aplicación. A continuación, se enumera el contenido del directorio:

Tabla 3.13. Programas y paquetes computacionales utilizados

NOMBRE DEL ARCHIVO	EXTENSIÓN	DESCRIPCIÓN
R-4.3.2-win	exe	Instalador del lenguaje de programación R
RStudio-2023.06.2-561	exe	Instalador del entorno de desarrollo RStudio
Rtools43-5863-5818	exe	Paquete de herramientas para instalar librerías
Versiones_antiguas	-	Carpeta de los instaladores para versiones antiguas de R
Basic-miktex-22-10-x64	exe	Instalador de la distribución de LaTeX
Pandoc-3.1-windows-x86_64	msi	Instalador del conversor de documentos a pdf

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En el segundo capítulo se describe el manejo de la aplicación, desde el ingreso de datos por el usuario, el procesamiento a seguir hasta la generación de los archivos de resultados. El manual de usuario de la aplicación DDissipator v1.0 se muestra en el Anexo II.

La instalación de estos programas se detallada en el manual de usuario de la aplicación que se encuentra en el anexo digital del siguiente enlace:

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/daniel_campana_epn_edu_ec/EvGtSs1XDL1KtRVYW2i7-kUBK45gOii-jrEtUEsJKZrdA?e=fdmSz2

3.2 Conclusiones

Acerca de la revisión bibliográfica

Los trabajos científicos acerca de disipadores como el pozo de salto y la rápida escalonada presentan múltiples estudios experimentales los cuales son una gran fuente de información, sin embargo, en disipadores como el estanque amortiguador y la viga de impacto debido a los grandes estudios que se han realizado por parte del US Bureau of Reclamation han dejado de desarrollarse nuevos trabajos técnicos en los últimos años.

Acerca del lenguaje de programación

El tiempo requerido en la elaboración de memorias de cálculo para dimensionar disipadores de energía se reduce significativamente debido a que RMarkdown permite crear informes técnicos a partir de texto narrativo y líneas de código desde un solo archivo al compilar la información procesada en un documento final.

El lenguaje de programación R y el paquete de herramientas RMarkdown proporcionan una combinación versátil en la generación de reportes técnicos debido a que tienen un alto nivel de personalización de la estructura, formato e idioma para presentación de los resultados.

Acerca de la lógica de programación

La librería RMarkdown de R facilita el llevar un orden adecuado entre el documento técnico y las líneas de programación, esto permite mostrar los resultados sin importar el caso que se defina con las variables calculadas.

Acerca de las memorias de cálculo

La creación de aplicaciones computacionales en el campo del diseño hidráulico permite valorar un mayor número de estructuras para un caso de diseño determinado, con lo cual se puede ampliar el criterio de análisis de las estructuras de disipación de energía.

La aplicación desarrollada en el presente trabajo de integración curricular proporciona nociones básicas de dimensionamiento de disipadores de energía y los resultados obtenidos no reemplazan los estudios de un diseño definitivo.

El disipador de energía con viga de impacto requiere una longitud tres veces más grande debido a que su diseño excede en dos metros el diámetro del pozo para el escenario A. Por tal motivo la disponibilidad de espacio es una condición importante a tener en cuenta, de lo contrario la opción del pozo de salto es la más adecuada por su facilidad constructiva y de mantenimiento.

La longitud que requiere la rápida de fondo escalonado para disipar la energía es menor a la del estanque amortiguador debido al lugar donde ocurre la disipación de energía; la rápida disipa la energía en los escalones a lo largo de la pendiente del terreno mientras que el estanque requiere de una longitud de 28.5 m desde el pie de la rápida para que se forme el resalto hidráulico en el escenario B. También se debe tener en cuenta que, debido al recorrido relativamente corto del terreno, el flujo de agua no alcanza el punto de inyección el cual debe estar antes del 50% del recorrido, por lo que el proceso de inyección de aire no se efectúa de manera adecuada.

3.3 Recomendaciones

Para futuras versiones de la aplicación se debe usar la librería “*flexdashboard*”, la cual genera una interfaz gráfica tipo tablero de opciones múltiples, donde se puede ejecutar varios casos en distintos disipadores de energía a la vez.

Se deben utilizar las bases de programación sentadas en el presente trabajo para desarrollar versiones más avanzadas de la aplicación DDissipator v1.0 de dimensionamiento de disipadores de energía, considerando otros tipos de flujo, archivos de resultados gráficos, obtención de volúmenes de obra y un mayor detalle del funcionamiento de los disipadores en función de nuevas investigaciones.

Mantener la unificación de la nomenclatura en las nuevas variables obtenidas en el cálculo del dimensionamiento de los disipadores de energía para mejorar la comprensión y comparación de los resultados en futuras versiones de la aplicación.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aisenbrey, A. J., Hayes, R. B., Warren, H. J., Winsett, D. L., & Young, R. B. (1978). *Design of small canal structures*. Bureau of Reclamation.
- Andrade, A., Schulz, H., Lobosco, R., & Porto, R. (2012). Stepped spillways: Theoretical, experimental and numerical studies. *Hydrodynamics - Natural Water Bodies*. Sao Paulo, Brasil.
- Castillón, C., & Tipán, W. (2023). *Análisis CFD del porcentaje de disipación de energía en rápidas escalonadas con flujo rasante para caudales pluviales de las zonas norte, centro y sur de la ciudad de Quito*. [Tesis de Grado], Universidad Politécnica Salesiana.
- Chanson, H. (2015). *Energy dissipation in hydraulic structures*. Editorial: CRC Press.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Editorial: McGraw-Hill.
- Coll, V., & Pérez, P. J. (2017). Recuperado de: https://www.uv.es/pjperez/curso_R/index.html
- Crispino, G., Contestabile, P., Vicinanza, D., & Gisonni, C. (2022). Energy dissipation in sewer fall manholes. *Proceedings of the 39th IAHR World Congress*. Granada, España. <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC2521716X202263>
- Del Toro Ávila, N. V. (2013). *Bases y criterios de diseño de canales con flujo escalonado y sujetos a aireación natural*. [Tesis de Grado], Universidad Central del Ecuador.
- E.S.P. (2013). *Normas de diseño de sistemas de alcantarillado de las empresas públicas de Medellín*. [Norma Técnica], Colombia.
- Granata, F., de Marinis, G., Gargano, R., & Hager, W. (2009). Energy loss in circular drop manholes. *33rd IAHR Congress: Water Engineering for a sustainable environment*.
- Haro, P., & Jara, M. F. (2006). *Manual básico de diseño de estructuras de cambio de nivel y cambio de dirección con flujo a gravedad*. [Tesis de Grado], Escuela Politécnica Nacional. Repositorio digital - EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2507>
- Khatsuria, R. M. (2005). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Editorial: Marcel Dekker.
- Llive, V. (2020). *Diseño del sistema de alcantarillado combinado y estructuras especiales para los barrios altos de la Argelia etapa tres y cuatro, parroquia la Argelia, cantón Quito, provincia de Pichincha*. [Trabajo de Titulación], Escuela Politécnica Salesiana.

- López Peñafiel, J. G., & Soto Morales, K. J. (2016). *Estudio en modelo físico para la evaluación del desarrollo y de la disipación de energía en flujo rasante sobre una rápida de fondo escalonado - Caso de la descarga del colector Iñaquito en la quebrada El Batán*. [Tesis de Grado], Escuela Politécnica Nacional. Repositorio digital - EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15268>
- Ma, Y., Zhu, D., Rajaratnam, N., & Van Duin, B. (2017). Energy dissipation in circular drop manholes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001241](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001241)
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6ta. ed.). Editorial: Person Education.
- Pardo Gómez, R. A., Lobaina Fernández, S., & Martí Díaz, D. E. (2017). *Monografía de disipadores de energía*. Universidad Tecnológica de la Habana.
- Peterka, A. J. (1984). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Bureau of Reclamation.
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*.
- Rosado Cantillo, G. A. (2017). *Metodología para el diseño de canales escalonados, disipadores de energía empleados en drenaje urbano, basada en modelación física*. [Tesis de Maestría], Universidad Nacional de Colombia.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General* (Vol. I). Editorial: Limusa.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales* (Vol. II). UNAM.
- Villamarín, S. (2013). *Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica*. [Tesis de Grado], Escuela Politécnica del Ejército.

5 ANEXOS

Anexo I. Memorias de cálculo

DISIPADOR DE ENERGÍA CON POZO DE SALTO

MEMORIA DE CÁLCULO

DANIEL CAMPAÑA E.

20 / 02 / 2024

Indice

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Funcionamiento de la Estructura	3
1.2 Esquema del Disipador	3
2 ECUACIONES UTILIZADAS	4
2.1 Componentes del Disipador	4
2.1.1 Colector de aproximación	4
2.1.2 Pozo vertical	5
2.1.3 Parámetro de caída	5
2.1.4 Número de impacto (I)	6
3 DATOS DE ENTRADA	7
4 RESULTADOS	8
4.1 Colector de Aproximación	8
4.2 Esquema del disipador	9
5 REFERENCIAS	10

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Funcionamiento de la Estructura

El pozo de salto o pozo de caída es una estructura que permite disipar la energía del flujo mediante el choque de este en las paredes del pozo que se encarga de dirigir un flujo de forma vertical entre dos colectores con distintas cotas. Las tuberías que llegan al pozo deben estar enterradas entre (0.6 - 4 m) (Llive, 2020).

Estos pozos pueden trabajar bajo régimen de descarga libre, régimen de flujo por orificio, régimen de flujo de salida presurizado y régimen de descarga sumergida (Ma et al., 2017).

Los pozos de salto se utilizan en sistemas de alcantarillado cuando el desnivel entre la tubería de llegada y la tubería de salida es mayor a (0.6 m). Los pozos disipan la energía del flujo para evitar problemas de erosión y socavación en la red de tuberías de alcantarillado.

La disipación de energía ocurre por la turbulencia que genera el impacto del flujo de aproximación en las paredes del pozo y la energía residual es disipada en el colchón de aguas al pie del pozo. Por lo tanto el análisis de la disipación de energía depende de la geometría del pozo y de la hidrodinámica del flujo de la aproximación (Crispino et al., 2022).

1.2 Esquema del Disipador

En la Figura 1 se muestra la forma de un pozo de salto estándar con una pantalla deflectora.

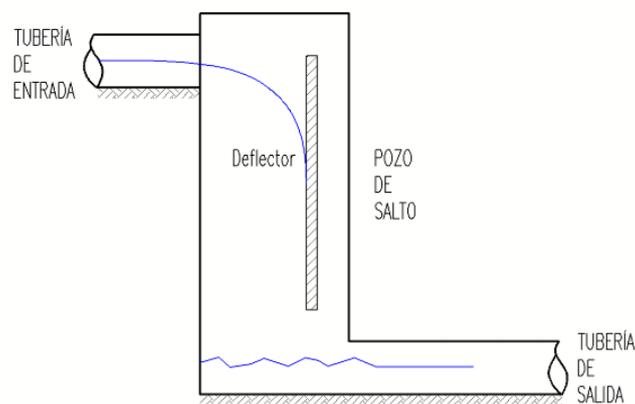


Figura 1: Esquema del pozo de salto
Elaborado por: Daniel Campaña E.

2 ECUACIONES UTILIZADAS

2.1 Componentes del Disipador

Los dos componentes analizados en el disipador de energía con pozo de salto son el colector de aproximación y el pozo vertical. A continuación, se presenta un resumen de las ecuación más importantes en el análisis de este disipador.

2.1.1 Colector de aproximación

Al considerar flujo uniforme las gradientes hidráulicas y geométricas en el colector son iguales (Krochin, 1986, p. 399). A partir de la ecuación de Darcy-Weisbach se estima la velocidad media del flujo de aproximación, reemplazando el diámetro por $D = 4 \cdot R_h$ y la pendiente se reemplaza por $S_0 = h_f/L$, obteniéndose la siguiente ecuación que es aplicable en canales de cualquier sección (Sotelo Ávila, 2002, p. 39).

$$V = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} \cdot \sqrt{R_h \cdot S_0}$$

Donde:

V : Velocidad media del flujo. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

f : Factor de fricción.

R_h : Radio hidráulico. (m)

S_0 : Pendiente longitudinal del colector. (m/m)

Factor de fricción (f)

El factor de fricción de la tubería de entrada se lo estima mediante de la ecuación desarrollada por P. K. Swamee y A. K. Jain en 1976, la cual proporciona un valor directo del factor de fricción (Mott, 2006).

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Donde:

f : Factor de fricción para flujo turbulento.

ε : Rugosidad absoluta de la tubería. (m)

D : Diámetro de la tubería. (m)

R_e : Número de Reynolds.

2.1.2 Pozo vertical

Coefficiente de pérdida de carga (K)

Un estudio presentado en la 39th IAHR World Congress determinó que el coeficiente de pérdida de carga se puede medir en función de la altura de caída y la velocidad media del flujo en el canal de aproximación. Para alturas cercanas a (0.50 m) se obtuvo la siguiente ecuación (Crispino et al., 2022, p. 2217).

$$K = 0.50 + 1.93 \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot H_s}}{V_0} \right)^2$$

Donde:

K : Coeficiente de pérdida de carga.

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

H_s : Altura de caída del pozo. (m)

V_0 : Velocidad del flujo en la tubería de aproximación. (m/s)

2.1.3 Parámetro de caída

Una de las variables calculadas más importantes en el análisis de los pozos de salto es el parámetro de caída. Este parámetro es función de la altura total de caída y de la velocidad del flujo en el colector de aproximación.

$$P_c = \frac{\sqrt{g \cdot H_s}}{V_0}$$

Donde:

P_c : Parámetro de caída.

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

H_s : Desnivel entre colectores. (m)

V_0 : Velocidad del flujo de aproximación. (m/s)

2.1.4 Número de impacto (I)

El parámetro conocido como número de impacto permite determinar el lugar donde el chorro de agua impactará en el pozo. Es función la geometría del pozo y de la hidrodinámica del flujo en la tubería de entrada.

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot H_s}{g}} \cdot \frac{V_0}{D_0}$$

Donde:

I : Número de caída.

H_s : Desnivel entre colectores. (m)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

V_0 : Velocidad del flujo de aproximación. (m/s)

D_0 : Diámetro del colector de aproximación. (m)

3 DATOS DE ENTRADA

El resumen de los datos de entrada de la tubería de ingreso se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos de entrada

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	1.850	(m^3/s)
Diámetro de la tubería	D_0	0.900	(m)
Diámetro del pozo	D_s	1.000	(m)
Pendiente de la tubería	S_0	0.010	(m/m)
Altura de caída del pozo	H_s	1.200	(m)
Rugosidad absoluta	e	0.002	(mm)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 2 se muestran los datos de entrada dentro de los límites establecidos. Si estos datos son mayores al 100% significa que superaron el límite establecido para este estudio.

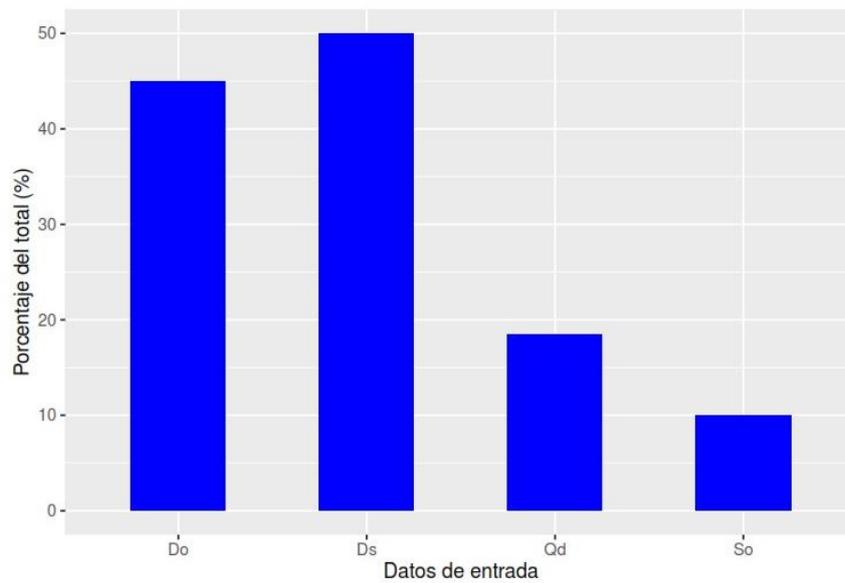


Figura 2: Datos de entrada (%) del total

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4 RESULTADOS

4.1 Colector de Aproximación

Los resultados son válidos cuando es posible transportar el caudal de diseño por la tubería propuesta. Si no existe solución para la tubería se debe cambiar uno o varios de los datos de entrada, caso contrario se considera a los resultados como válidos.

En este caso se determinó que: **existe solución para esta tubería.**

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los valores calculados que determinan las características hidrodinámicas del flujo de aproximación.

Tabla 2: Valores calculados del colector de aproximación

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Ángulo de flujo	ω	204.06	($^{\circ}$)
Área hidráulica	A_h	0.40	(m^2)
Perímetro mojado	P_m	1.60	(m)
Radio hidráulico	R_h	0.25	(m)
Diámetro hidráulico	D_h	1.00	(m)
Factor de fricción	f	0.01	(—)
Velocidad	V_0	4.60	(m/s)
Calado	y_0	0.54	(m)
Número de Froude	Fr_0	2.18	(—)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Se obtuvo un número de Froude $F_r=2.18$ lo que indica que el flujo en el colector de aproximación es supercrítico.

4.2 Esquema del dissipador

En la Figura 3, se puede observar un esquema de la vista en elevación del pozo de salto.

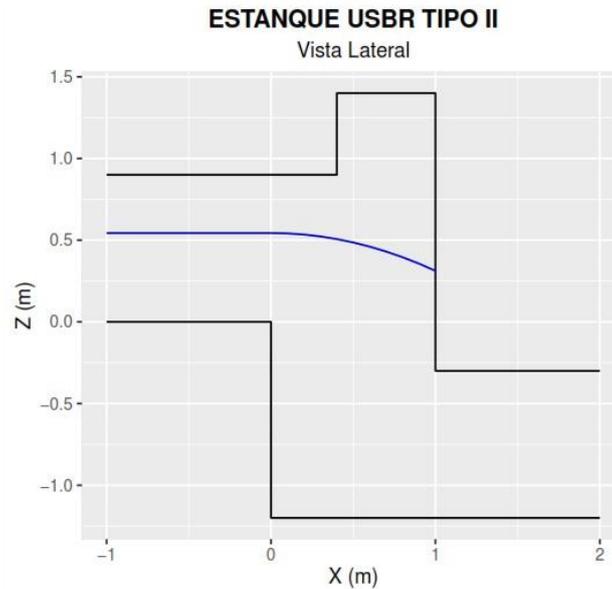


Figura 3: Vista en elevación del pozo de salto

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Utilizando la ecuación de la trayectoria del flujo y calculando el número de impacto $I=2.5$, se demuestra que el flujo de agua impacta contra la pared opuesta del pozo.

Según el método propuesto por Crispino (2022) se obtuvo un coeficiente de pérdida de carga de $K=1.4$ el cual se utiliza para estimar la pérdida de carga en el pozo de salto de la siguiente manera: $K \cdot V^2/2g$

Archivo adjunto

Posterior a los cálculos realizados se generó un archivo en formato (.xlsx) que contiene un conjunto de pares ordenados que permite generar un esquema básico de la vista lateral del dissipador. Estos grupos de datos pueden ser insertados en autocad como polilíneas. Los pares ordenados que conforman estos esquemas del dissipador se encuentran en el archivo adjunto de nombre: "**Salto_cad.xlsx**"

5 REFERENCIAS

- Crispino, G., Contaestabile, P., Vicinanza, D., & Gisonni, C. (2022). *Energy dissipation in sewer fall manholes*. Proceedings of the 39th IAHR World Congress. Granada, España. <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC2521716X202263>
- Krochin, S. (1986). *Diseño hidráulico*. (3ra. ed.). Editorial de la Escuela Politécnica Nacional.
- Llive, V. (2020). *Diseño de sistemas de alcantarillado combinado y estructuras especiales para los barrios altos de la Argelia etapa tres y cuatro, parroquia la Argelia, cantón Quito, provincia de Pichincha*. [Trabajo de Titulación]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Ma, Y., Zhu, D., Rajaratnam, N., & Van Duin, B. (2017). *Energy dissipation in circular drop manholes*. Proceedings of the 39th IAHR World Congress. Granada, España. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001241](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001241)
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. (6ta. ed.). Editorial: Pearson Education.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales: Vol. II*. UNAM.

DISIPADOR DE ENERGÍA CON ESTANQUE AMORTIGUADOR

MEMORIA DE CÁLCULO

DANIEL CAMPAÑA E.

20 / 02 / 2024

Índice

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Funcionamiento de la Estructura	3
1.2	Esquema del Disipador	3
2	ECUACIONES UTILIZADAS	4
2.1	Resalto hidráulico	4
2.2	Capacidad de la Estructura	5
3	DATOS DE ENTRADA	8
4	RESULTADOS	9
4.1	Vista lateral	10
4.2	Factor de seguridad	12
5	REFERENCIAS	13

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Funcionamiento de la Estructura

Los estanques amortiguadores son estructuras especiales cuyo trabajo es disipar el exceso de energía hidráulica a través de la formación de un resalto hidráulico. Están ubicadas al pie de un cimacio vertedor o de una rápida.

El principio por el cual estas estructuras disipan la energía es el resalto hidráulico. El resalto se formará al pie de la descarga y según el Bureau of Reclamation el tipo de estanque dependerá del número de Froude (Peterka, 1984).

Debido al espacio que necesita este disipador para su construcción y funcionamiento se lo recomienda como disipador de fin de línea, es decir, en el lugar de la descarga del colector.

1.2 Esquema del Disipador

Los distintos tipos de estanque amortiguador se muestran en la Figura 1.

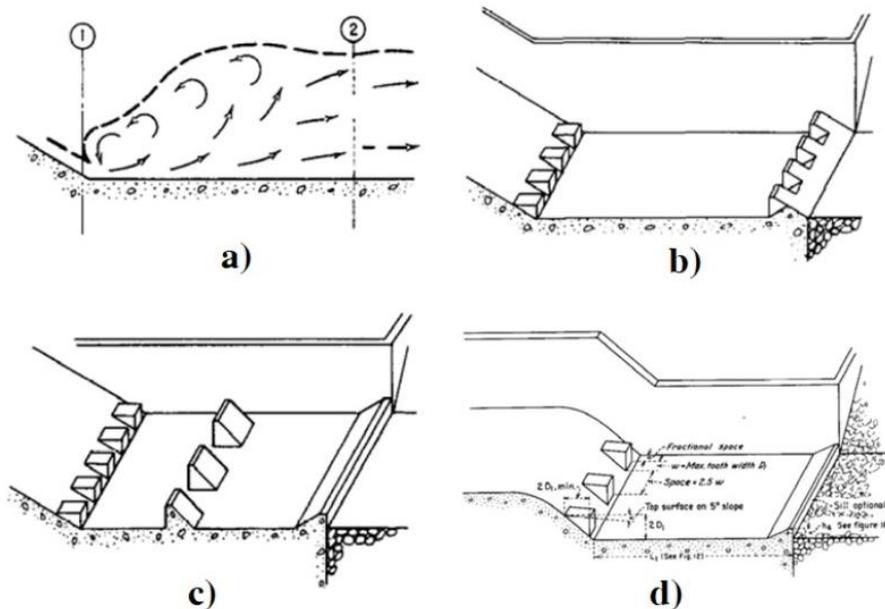


Figura 1: Tipos de pozos amortiguadores
Fuente: (Peterka, 1984)

2 ECUACIONES UTILIZADAS

2.1 Resalto hidráulico

El resalto hidráulico es el cambio brusco de régimen supercrítico a subcrítico y la disipación de energía ocurre por turbulencia y mezcla agua aire.

Calado conjugado (y_2)

Conocido el calado al pie de la descarga de la tubería se puede calcular el calado conjugado aguas abajo del resalto mediante la siguiente ecuación cuyo desglose se lo puede revisar en (Rocha, 2007, p. 382).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right)$$

Donde:

y_2 : Profundidad del flujo después del resalto hidráulico. (m)

y_1 : Profundidad del flujo al pie de la descarga. (m)

Fr_1 : Número de Froude al pie de la descarga.

Las dimensiones de los accesorios del estanque amortiguador Tipo II, son función de los tirantes del flujo antes y después de la formación del resalto hidráulico.

En la Figura 2 se puede apreciar las dimensiones de los accesorios del estanque Tipo II.

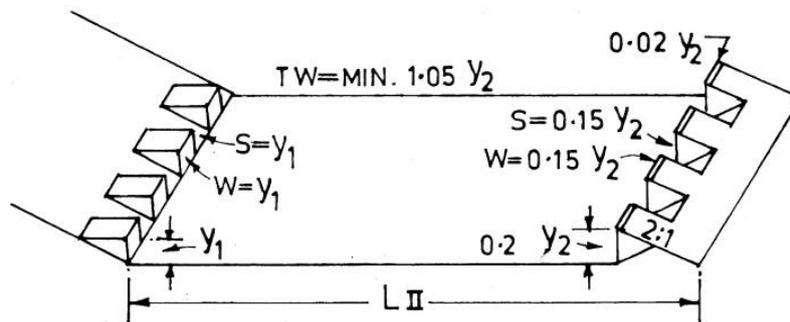


Figura 2: Dimensiones del estanque USBR tipo II
Fuente: (Khatsuria, 2005)

Se pueden utilizar ábacos para estimar el calado después del resalto (y_2) (Khatsuria, 2005, p. 404). En la Figura 3 se muestra un ábaco para hallar la relación de la longitud del estanque versus el tirante conjugado después del estanque (L/y_2).

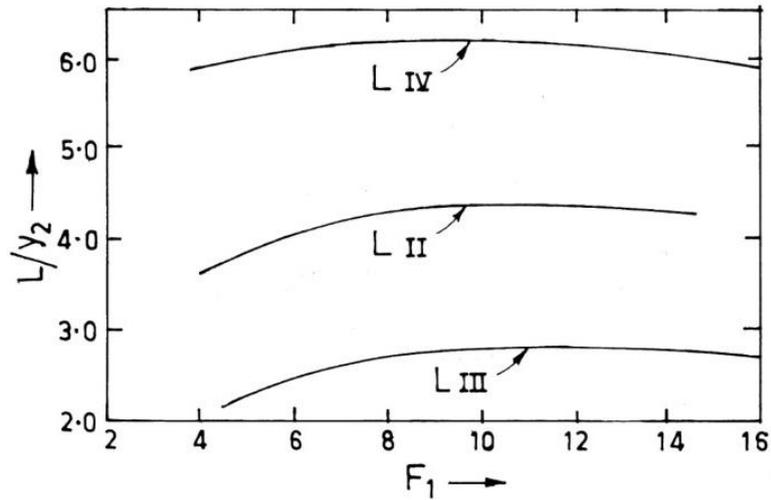


Figura 3: Ábaco para hallar la relación L/y_2
Fuente: (Khatsuria, 2005)

2.2 Capacidad de la Estructura

Pérdida de energía (ΔE)

La pérdida de energía en el resalto hidráulico es igual a la diferencia de energías antes y después del resalto. Se la estima con la siguiente ecuación en función de los calados conjugados (Chow, 1994, p. 388).

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2}$$

Donde:

- ΔE : Pérdida de energía en el resalto. (m)
- E_1 : Energía antes de resalto hidráulico. (m)
- E_2 : Energía después de resalto hidráulico. (m)
- y_1 : Calado del flujo antes del resalto. (m)
- y_2 : Calado del flujo después del resalto. (m)

Energía antes del resalto hidráulico (E_1)

La energía antes del resalto se la calcula en función del número de Froude (Fr_1) y de la geometría de la sección antes del resalto (Sotelo Ávila, 2002, p. 326), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$E_1 = y_1 + \frac{Fr_1^2 \cdot A_1}{2 \cdot T_1}$$

Donde:

E_1 : Energía antes de resalto. (m)

y_1 : Profundidad del flujo antes del resalto. (m)

Fr_1 : Número de Froude antes del resalto.

A_1 : Área hidráulica antes de resalto. (m^2)

T_1 : Ancho superficial antes del resalto. (m)

Energía después del resalto hidráulico (E_2)

La energía después del resalto también se puede calcular en función del Número de Froude antes del salto y de la geometría antes y después del resalto como se muestra en la siguiente ecuación.

$$E_2 = y_2 + \frac{Fr_1^2 \cdot A_1^3}{2 \cdot T_1 \cdot A_2^2}$$

Donde:

E_2 : Energía después de resalto. (m)

y_2 : Profundidad del flujo después del resalto. (m)

Fr_1 : Número de Froude antes del resalto.

A_1 : Área hidráulica antes de resalto. (m^2)

T_1 : Ancho superficial antes del resalto. (m)

A_2 : Área hidráulica después de resalto. (m^2)

Eficiencia

La eficiencia del resalto hidráulico como disipador se calcula como la relación de la pérdida de energía y la carga hidráulica antes del resalto, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{h_s}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1}$$

Donde:

η : Eficiencia del resalto hidráulico.

h_s : Pérdida de energía en el resalto. (m)

H_1 : Carga hidráulica antes del resalto. (m)

H_2 : Carga hidráulica después de resalto. (m²)

Nota: La carga hidráulica (H) es igual a la energía (E) en una sección determinada siempre que la inclinación del fondo tenga una pendiente pequeña. Se puede considerar una pendiente pequeña si el ángulo es menor a 8° o menor al 15%.

3 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada usados para el dimensionamiento del dissipador con estanque amortiguador se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos de entrada

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	35.00	(m^3/s)
Ancho del canal	b_0	2.80	(m)
Calado inicial	y_0	2.43	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 4 se muestran los datos de entrada dentro de los límites establecidos. Si estos datos son mayores al 100% significa que superaron el límite establecido para este estudio.

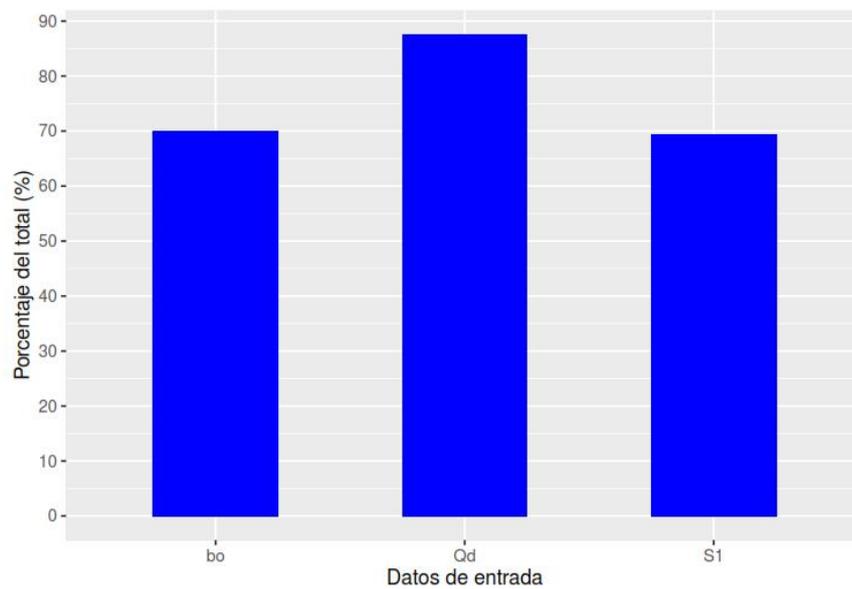


Figura 4: Datos de entrada (%) del total

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4 RESULTADOS

Se obtuvo un número de Froude ($Fr_1 = 7.9$) y una velocidad del flujo al pie de la descarga igual a ($V_1 = 19.6 \text{ m/s}$) por lo tanto se requiere un estanque USBR tipo II.

En la Tabla 2 se muestra las dimensiones calculadas de los dientes deflectores y de el umbral terminal dentado.

Tabla 2: Dimensiones del estanque USBR Tipo II

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Altura del diente deflector	h_1	0.6	(m)
Ancho del diente deflector	w_1	0.6	(m)
Separación entre dientes	s_1	0.6	(m)
Distancia diente-muro	c_1	0.3	(m)
Altura del umbral dentado	h_2	1.4	(m)
Ancho del diente del umbral	w_2	1.0	(m)
Separación de dientes del umbral	s_2	1.0	(m)
Ancho de la cresta del umbral	c_2	0.1	(m)
Longitud del estanque	L_2	28.5	(m)

4.1 Vista lateral

En la Figura 5 se muestra la vista lateral del estanque amortiguador tipo II.

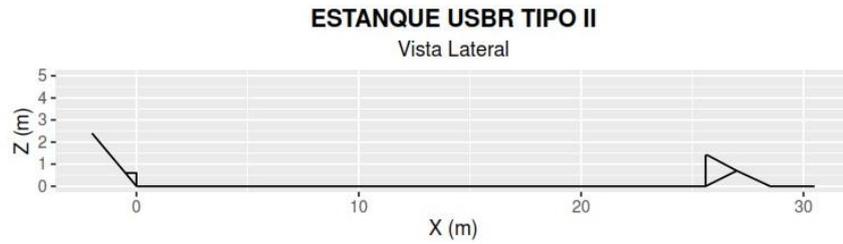


Figura 5: Vista lateral - Estanque amortiguador

Elaborado por: Daniel Campaña E.

La longitud del disipador es de 28.50 m desde los dientes deflectores hasta el umbral terminal dentado.

El detalle de los dientes deflectores se muestra en la Figura 6.

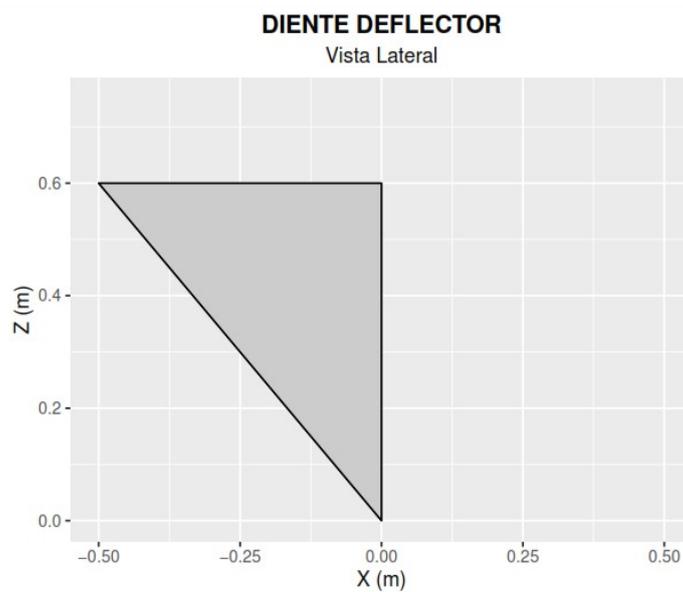


Figura 6: Vista lateral - Diente deflector

Elaborado por: Daniel Campaña E.

El detalle de las dimensiones del umbral terminal dentado se muestra en la Figura 7.

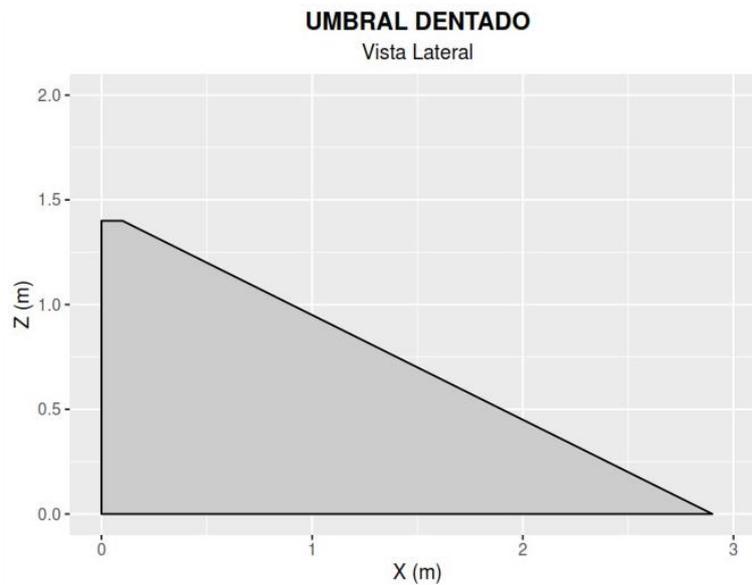


Figura 7: Vista lateral - Umbral terminal

Los valores de las dimensiones del umbral dentado se muestran en la Tabla 2 y la ubicación se la puede observar en la Figura 2.

4.2 Factor de seguridad

El factor de seguridad (η) se calcula para evitar que el flujo se salga del canal. En este caso se obtuvo un resalto **ESTABLE** y un factor de seguridad $\eta = 1$

Este factor de seguridad indica que el muro del canal del estanque no necesita elevarse más que una altura igual al tirante conjugado (y_2).

5 REFERENCIAS

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Editorial: McGraw-Hill.

Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Editorial: Marcel Dekker.

Peterka, A. J. (1984). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Bureau of Reclamation.

Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*.

Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales: Vol. II*. UNAM.

DISIPADOR DE ENERGÍA CON VIGA DE IMPACTO

MEMORIA DE CÁLCULO

DANIEL CAMPAÑA E.

20 / 02 / 2024

Índice

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Funcionamiento de la Estructura	3
1.2	Esquema del Disipador	3
2	ECUACIONES UTILIZADAS	4
2.1	Componentes del Disipador	4
2.1.1	Colector de aproximación	4
2.1.2	Cámara de disipación	5
2.2	Capacidad de la Estructura	7
3	DATOS DE ENTRADA	8
4	RESULTADOS	9
4.1	Colector de Aproximación	9
4.2	Cámara de Disipación	10
4.3	Deflector	11
5	REFERENCIAS	14

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Funcionamiento de la Estructura

Esta estructura de disipación de energía reduce la velocidad del flujo de aproximación mediante el impacto del chorro de agua en un deflector vertical suspendido en una cámara relativamente pequeña. La disipación de energía ocurre por los cambios bruscos en la dirección del flujo cuando choca con el deflector o viga de impacto, formándose alta turbulencia y remolinos en la cámara de disipación.

Según el U.S. Bureau of Reclamation (USBR) el dissipador de energía tipo VI garantiza su durabilidad contra erosión y socavación, siempre y cuando no se superen los parámetros de diseño que se muestran a continuación (Peterka, 1984):

- El número de Froude debe ser menor a ($F_r \leq 10$).
- La velocidad media máxima ($V_0 \leq 9 \text{ m/s}$).
- La descarga debe ser máximo ($Q_d \leq 10 \text{ m}^3/\text{s}$).

1.2 Esquema del Dissipador

En la Figura 1 se muestra un esquema del dissipador de energía con viga de impacto.

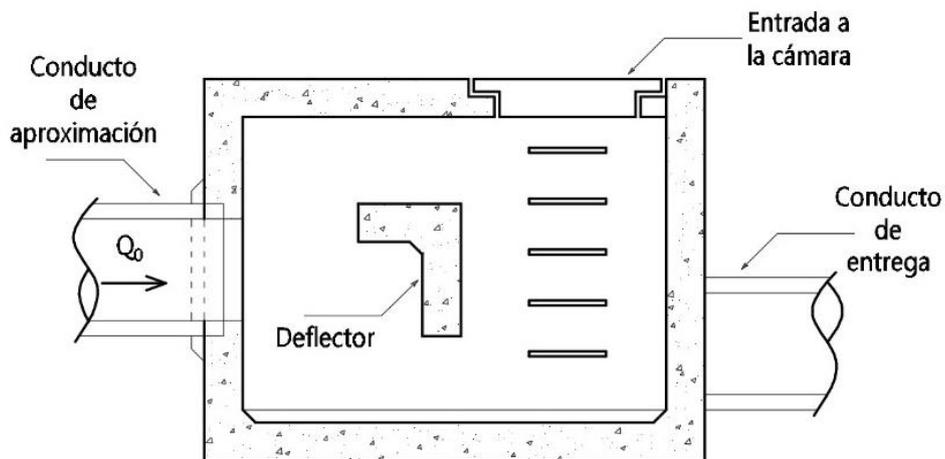


Figura 1: Esquema de la viga de impacto
Elaborado por: Daniel Campaña E.

2 ECUACIONES UTILIZADAS

2.1 Componentes del Disipador

El orden de las ecuaciones van acorde al sentido del flujo a través de los componentes del disipador.

2.1.1 Colector de aproximación

Al considerar flujo uniforme las gradientes hidráulicas y geométricas en el colector son iguales (Krochin, 1986, p. 399). A partir de la ecuación de Darcy-Weisbach se estima la velocidad media del flujo de aproximación, reemplazando el diámetro por $D = 4 \cdot R_h$ y la pendiente se reemplaza por $S_0 = h_f/L$, obteniéndose la siguiente ecuación que es aplicable en canales de cualquier sección (Sotelo Ávila, 2002, p. 39).

$$V = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} \cdot \sqrt{R_h \cdot S_0}$$

Donde:

V : Velocidad media del flujo. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

f : Factor de fricción.

R_h : Radio hidráulico. (m)

S_0 : Pendiente longitudinal del colector. (m/m)

Factor de fricción (f)

El factor de fricción para flujo laminar se lo estima únicamente en función del número de Reynolds mediante la siguiente ecuación (Mott, 2006, p. 234).

$$f = \frac{64}{R_e}$$

Donde:

f : Factor de fricción.

R_e : Número de Reynolds.

El factor de fricción para flujo turbulento en el colector de aproximación se estima mediante la ecuación desarrollada por P. K. Swamee y A. K. Jain desarrollada en 1976 (Mott, 2006, p. 242), la cual proporciona valores directos del coeficiente de fricción (f) sin necesidad de iterar.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)\right]^2}$$

Donde:

f : Factor de fricción para flujo turbulento.

ε : Rugosidad absoluta de la tubería. (m)

D : Diámetro de la tubería. (m)

Re : Número de Reynolds.

Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas. Clasifica al flujo en laminar, turbulento o en transición. Se lo calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu}$$

Donde:

Re : Número de Reynolds.

L : Longitud característica de la sección. (m)

V : Velocidad media de la sección. (m/s)

ν : Viscosidad cinemática del agua. (m^2/s)

Nota: La longitud característica (L) en conducciones a tubo lleno es igual al diámetro interno (D) en cambio para conductos semilenos esta longitud será igual al radio hidráulico (R_h) (Mott, 2006).

2.1.2 Cámara de disipación

El ancho de la cámara de disipación (W) es el parámetro más importante, debido a que gran parte de las dimensiones dependen de este valor. Se lo puede calcular mediante un ábaco,

con el número de Froude se obtiene la relación (W/d) donde (d) es la profundidad hidráulica de la cámara de disipación (Chanson, 2015).

La recta que está representada en la Figura 2 es una de las formas para encontrar el ancho de la cámara de disipación del dissipador con viga de impacto.

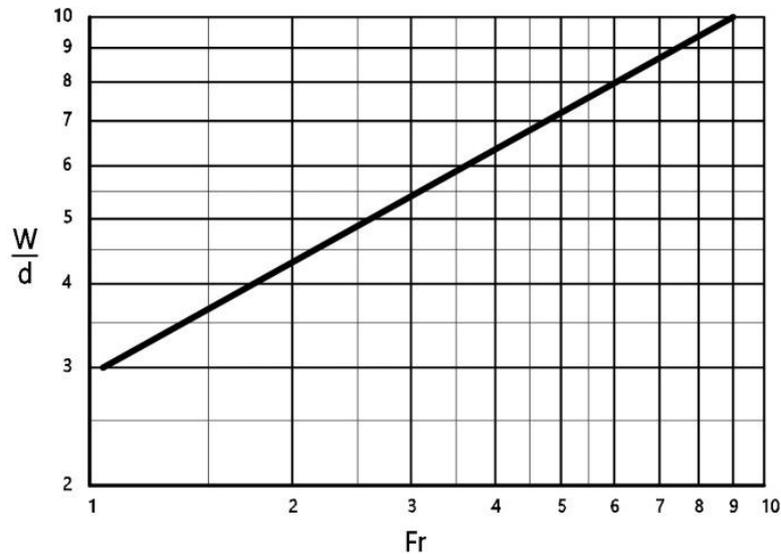


Figura 2: Relación W/d función del número de Froude
Elaborado por: Daniel Campaña E.

La otra forma para encontrar el ancho de la cámara (W) es mediante la ecuación propuesta por la USBR para estanque tipo VI (Chanson, 2015, p. 133).

$$\frac{W}{d} = 2.868 \cdot F_r^{0.5664}$$

Donde:

W/d : Relación para obtener el ancho de la cámara de disipación.

W : Ancho de la cámara de disipación. (m)

d : Profundidad hidráulica de la cámara de disipación. (m)

F_r : Número de Froude en la cámara de disipación.

El flujo de agua al salir de la tubería de aproximación tendrá una trayectoria parabólica. Se comprobó el alcance del chorro de agua con un análisis del recorrido del flujo hasta caer en el fondo del pozo. Esta trayectoria se estimó con la siguiente ecuación (Granata et al., 2009).

$$y = H_s - \left(\frac{g}{V_0^2} \right) \cdot x^2$$

Donde:

y : Variación del flujo en el eje de las ordenadas. (m)

H_s : Desnivel entre colectores. (m)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

V_0 : Velocidad del flujo de aproximación. (m/s)

x : Variación del flujo en el eje de las abscisas. (m)

2.2 Capacidad de la Estructura

La carga total en una sección determinada viene dada por la ecuación que se muestra a continuación (Camino Zapata, 2011).

$$H = z + y + \alpha \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

H : Carga total de energía en una sección. (m)

z : Carga de posición, del nivel de referencia al invert. (m)

y : profundidad hidráulica. (m)

α : Coeficiente de energía cinética (se asumió $\alpha = 1$).

V : Velocidad media de flujo. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

3 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada usados para el dimensionamiento del dissipador con viga de impacto se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos de entrada

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	1.850	(m^3/s)
Diámetro del conducto	D_0	0.900	(m)
Pendiente longitudinal	S_0	0.010	(m/m)
Desnivel entre colectores	H_s	1.200	(m)
Rugosidad absoluta	ε	0.002	(mm)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 3 se muestran los datos de entrada dentro de los límites establecidos. Si estos datos son mayores al 100% significa que superaron el límite establecido para este estudio.

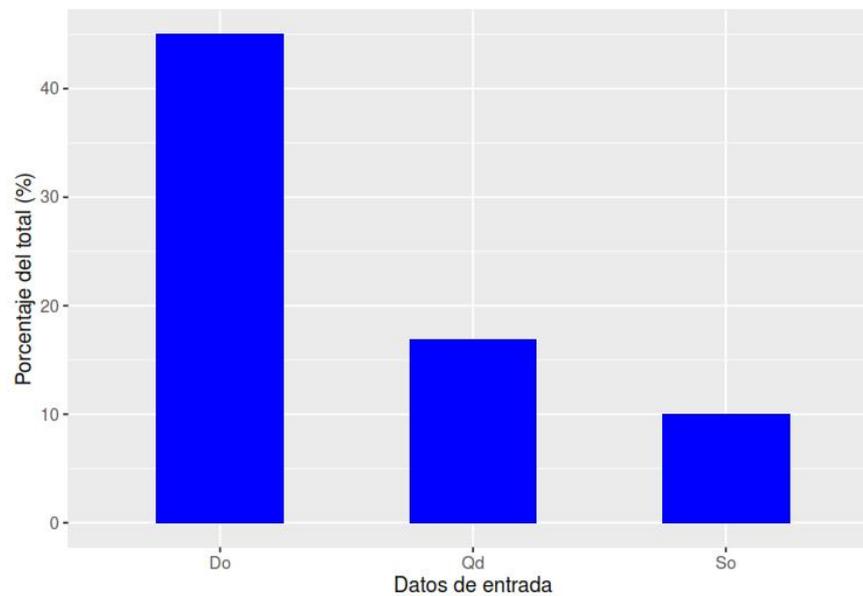


Figura 3: Datos de entrada (%) del total

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4 RESULTADOS

4.1 Colector de Aproximación

Los resultados son válidos cuando es posible transportar el caudal de diseño por la tubería propuesta. Si no existe solución para la tubería se debe cambiar uno o varios de los datos de entrada, caso contrario se considera a los resultados como válidos.

En este caso se determinó que: **existe solución para esta tubería.**

En la Tabla 2 se muestra el resumen de los valores calculados que determinan las características hidrodinámicas del flujo de aproximación.

Tabla 2: Valores calculados del colector de aproximación

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Ángulo de flujo	ω	204.06	($^{\circ}$)
Área hidráulica	A_h	0.40	(m^2)
Perímetro mojado	P_m	1.60	(m)
Radio hidráulico	R_h	0.25	(m)
Diámetro hidráulico	D_h	1.00	(m)
Factor de fricción	f	0.01	($-$)
Velocidad	V_0	4.60	(m/s)
Calado	y_0	0.54	(m)
Número de Froude	Fr_0	2.18	($-$)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4.2 Cámara de Disipación

En la Figura 4 se observa que para un número de Froude $Fr = 2.06$ se obtiene una relación $W/d = 4.32$.

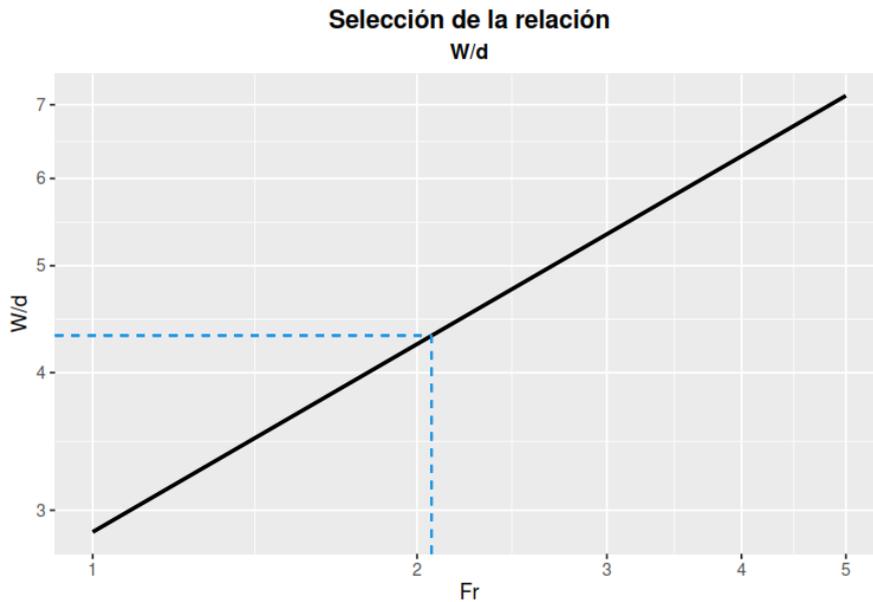


Figura 4: Determinación de la relación W/d

Elaborado por: Daniel Campaña E.

A partir de la gráfica de la Figura 4 se estimó el ancho de la cámara de disipación.

Tabla 3: Parametros hidrodinámicos

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Calado equivalente	y_e	0.564	(m)
Velocidad	V_t	4.852	(m/s)
Número de Froude	Fr	2.063	(-)
Ancho de la cámara	W	2.500	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

El calado que tendrá el flujo de agua al inicio de la cámara de disipación luego de chocar contra el deflector se lo halla mediante la conservación de la energía.

4.3 Deflector

El deflector o viga es a parte de la estructura donde impacta el chorro de agua que llega de la tubería de ingreso al pozo.

Parámetros

Los valores calculados en la Tabla 4 representan las dimensiones de la vista en elevación de la viga de impacto.

Tabla 4: Dimensiones de la viga de impacto

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	1.85	(m^3/s)
Diámetro	D_0	0.90	(m)
Altura de la cámara	Z	2.65	(m)
Longitud de la viga	k	0.42	(m)
Altura de la viga	b	0.94	(m)
Espesor de la viga	m	0.21	(m)
Distancia hasta la viga	L_1	1.25	(m)
Altura de la grada	k_g	0.42	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Vista lateral

La ubicación de las dimensiones de la Tabla 4 obtenidas se muestran en la Figura 5

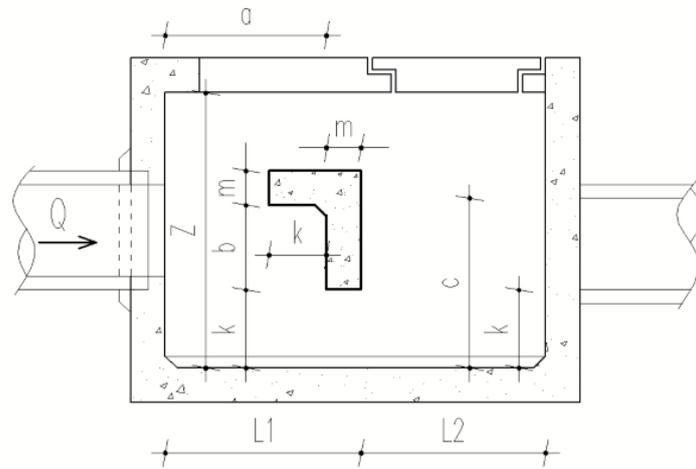


Figura 5: Esquema de las dimensiones de la viga de impacto
Elaborado por: Daniel Campaña E.

Vista Superior

En la Figura 6 se muestra un esquema de la vista superior del dissipador con viga de impacto.

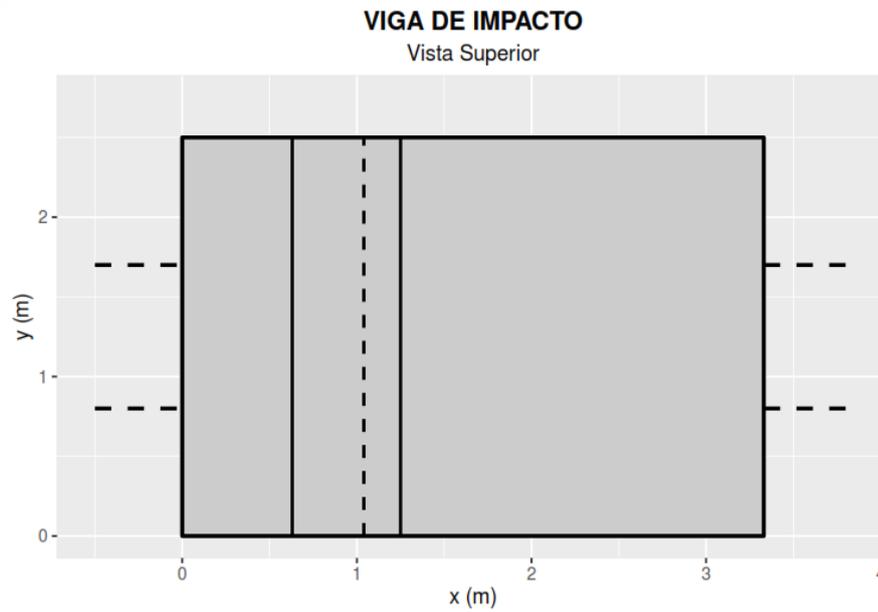


Figura 6: Vista en planta del dissipador

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Trayectoria del flujo

Utilizando la ecuación de la trayectoria del flujo del capítulo 3 se estimó el recorrido de la superficie del flujo para confirmar su alcance hacia la viga.

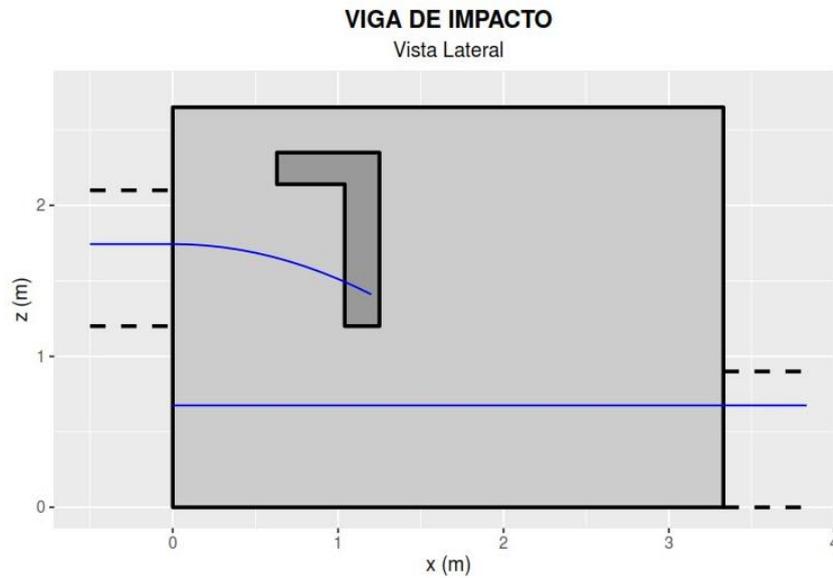


Figura 7: Vista en elevación del disipador

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Archivo adjunto

Posterior a los cálculos realizados se generó un archivo en formato (.xlsx) que contiene un conjunto de pares ordenados que permite generar un esquema básico de las vistas lateral y superior del disipador. Estos grupos de datos pueden ser insertados en autocad como polilíneas una columna a la vez. Los pares ordenados que conforman estos esquemas del disipador se encuentran en el archivo adjunto de nombre: **"Viga_cad.xlsx"**

5 REFERENCIAS

- Camino Zapata, G. A. (2011). *Hydraulics of plunging drop structures in urban drainage systems*. [Tesis de Doctorado]. University of Alberta.
- Chanson, H. (2015). *Energy dissipation in hydraulics structures*. Editorial: CRC Press.
- Granata, G., Francesco, Gargano, R., & Hager, W. (2009). *Energy loss in circular drop manholes*.
- Krochin, S. (1986). *Diseño hidráulico*. (3ra. ed.). Editorial de la Escuela Politécnica Nacional.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. (6ta. ed.). Editorial: Pearson Education.
- Peterka, A. J. (1984). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Bureau of Reclamation.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales: Vol. II*. UNAM.

DISIPADOR DE ENERGÍA CON RÁPIDA DE FONDO ESCALONADO

MEMORIA DE CÁLCULO

DANIEL CAMPAÑA E.

20 / 02 / 2024

Índice

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Funcionamiento de la Estructura	3
1.2 Esquema del Disipador	3
2 ECUACIONES UTILIZADAS	5
2.1 Límites según el tipo de flujo	5
3 DATOS DE ENTRADA	9
4 RESULTADOS	10
4.1 Comprobación de flujo rasante	11
4.2 Esquema de los escalones	12
5 REFERENCIAS	14

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Funcionamiento de la Estructura

El disipador de energía con rápida de fondo escalonado es muy útil en lugares donde existen taludes de gran pendiente por lo que la energía cinética del flujo es elevada y puede causar erosión y socavación en la estructura. En estos casos son efectivos este tipo de disipadores por su facilidad constructiva y su alta eficiencia (Rosado Cantillo, 2017).

Se puede diferenciar tres tipos de flujo sobre una rápida escalonada, cuando el flujo choca en la huella de cada escalón se conoce como flujo saltante o escalón por escalón en adelante nombrado como (**FEXE**).

El segundo tipo de flujo se da cuando el fondo falso o pseudo-fondo del flujo toca las esquinas externas de los escalones, en este caso la disipación de energía ocurre por la recirculación de agua en la parte interna de los escalones (Castillón Rosero & Tipán Tipán, 2023, p. 6). Este flujo se conoce como rasante y en adelante se lo nombrará como (**FRAS**).

El paso de flujo saltante a flujo rasante no ocurre súbitamente y se denomina flujo en transición el cual no es recomendable en el diseño ya que su comportamiento no está bien definido. Este tipo de disipador se lo considera como un disipador de fin de línea por lo que su ubicación estará en la descarga del colector.

El ángulo de inclinación del terreno está limitado a un rango entre 19 - 55 grados en estudios realizados por Ohtsu et al. (2004) (Andrade et al., 2012, p. 239). El flujo rasante se obtiene para una relación de $(h/y_c > 1)$ y una relación de $(h/l > 0.5)$ mayor a 0.5 aproximadamente.

1.2 Esquema del Disipador

Como se mencionó anteriormente existen tres tipos de flujo sobre una rápida de fondo escalonado. En la Figura 1 se muestra un esquema con los diferentes tipos de flujo que son:

- a) Flujo saltante (FEXE)
- b) Flujo en transición
- c) Flujo rasante (FRAS)

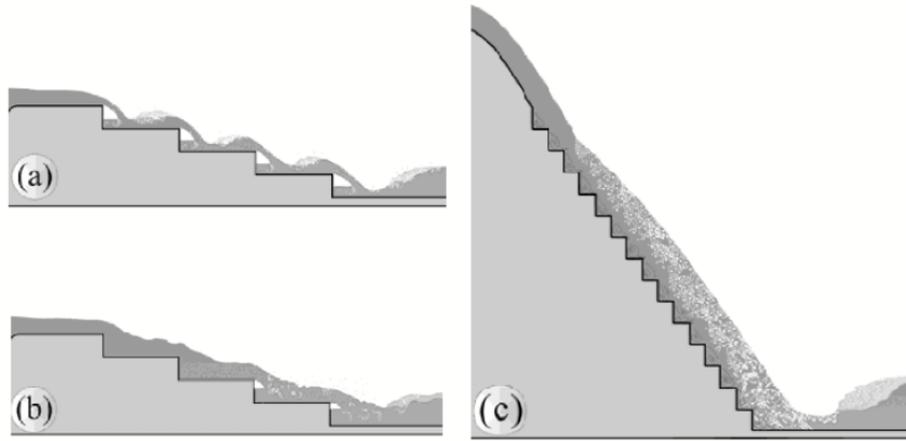


Figura 1: Esquema de rápida escalonada
Fuente: (Andrade et al., 2012, p. 237)

2 ECUACIONES UTILIZADAS

2.1 Límites según el tipo de flujo

La rápida escalonada presenta tres tipos de flujo que son: flujo escalón por escalón (**FEXE**), flujo en transición y flujo rasante (**FRAS**). Los límites para cada tipo de flujo se estiman mediante las ecuaciones de (Chanson), (Ohtsu y Yasuda) y (Chanson y Lenno).

Tipo de flujo

El tipo de flujo en una rápida escalonada esta determinado por la relación (h/l) de los escalones y el calado crítico. El límite para flujo rasante se expresa por la ecuación que representa un promedio muy cercano de estudio entre las curvas de Ohtsu & Yasuda y Chanson (Castillón Rosero & Tipán Tipán, 2023, p. 7).

$$\frac{y_c}{h} = \frac{0.881}{\left(\frac{h}{l} + 0.149\right)^{0.317}}$$

Donde:

y_c/h : Relación calado crítico-altura del escalón.

h/l : Relación altura-longitud del escalón.

Calado crítico (y_c)

Es la altura del flujo donde la energía específica es mínima. Su valor depende del caudal unitario como se muestra en la siguiente ecuación.

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Donde:

y_c : Calado crítico. (m)

q : Caudal unitario. ($m^3/s/m$)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

Calado normal (y_n)

Para calcular el calado normal se utiliza la ecuación de Boes y Hager (Khatsuria, 2005, p. 109).

$$y_n = 0.215 \cdot y_c \cdot [\sin(\theta)]^{-1/3}$$

Donde

y_n : Calado normal. (m)

y_c : Calado crítico. (m)

θ : Ángulo de inclinación de la rápida. (°)

Rugosidad relativa del escalón (K_i)

También conocida como altura de rugosidad es la distancia perpendicular al pseudo-fondo y se la estima con la siguiente ecuación (Khatsuria, 2005, p. 111).

$$K_i = h \cdot \cos(\alpha)$$

Donde:

K_i : Rugosidad relativa del escalón.

h : Altura de la contrahuella. (m)

α : Ángulo de diseño de la rápida. (°)

Froude de rugosidad (F_i)

El Froude de rugosidad es función de la rugosidad relativa, la relación contrahuella-huella y el caudal unitario y se lo estima mediante la siguiente ecuación:

$$F_i = \frac{q}{\sqrt{g \cdot \frac{h}{l} \cdot K_i^3}}$$

Donde:

F_i : Froude de rugosidad.

q : Caudal unitario. ($m^3/s/m$)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

h/l : Relación altura-longitud del escalón. (m/m)

K_i : Rugosidad relativa del escalón.

Longitud al punto de inserción de aire (L_i)

La rápida debe ser lo suficientemente larga para que el punto de inicio de auto-aireación ocurra en la primera mitad de la rápida. Y se garantice una alta eficiencia de entrada de aire hasta llegar al pie de la rápida. Si la longitud de la rápida es menor que el punto de autoaireación el ingreso de aire no ocurre o no se desarrolla por completo.

$$L_i = K_i \cdot 9.6528 \cdot F_i^{0.7737}$$

Donde:

L_i : Longitud al punto de inserción de aire. (m)

K_i : Rugosidad relativa del escalón.

F_i : Froude de rugosidad.

Energía residual (H_{res})

La energía residual al pie de rápida escalonada se estima con la siguiente ecuación.

$$H_{res} = d \cdot \cos(\alpha) + \frac{q^2}{2 \cdot g \cdot d^2}$$

Donde:

H_{res} : Energía residual. (m)

d : Profundidad del flujo ideal. (m)

α : Ángulo de inclinación de la rápida. ($^\circ$)

q : Caudal unitario. ($m^3/s/m$)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

Profundidad de flujo ideal (d)

La profundidad del flujo ideal se mide como la relación del caudal unitario y la velocidad máxima, como se observa en la siguiente ecuación.

$$d = \frac{q}{V_{max}}$$

Donde:

d : Profundidad de flujo ideal. (m)

q : Caudal unitario. ($m^3/s/m$)

V_{max} : Velocidad máxima del flujo. (m/s)

3 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada usados para el dimensionamiento del dissipador con rápida de fondo escalonado se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos de entrada

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	35.00	(m^3/s)
Ancho del conducto de aproximación	b_0	2.80	(m)
Pendiente de conducto	S_0	0.01	(m/m)
Pendiente del terreno	S_1	1.20	(m/m)
Desnivel entre colectores	H_s	16.50	(m)
Altura de la contrahuella	h	1.00	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 2 se muestran los datos de entrada dentro de los límites establecidos. Si estos datos son mayores al 100% significa que superaron el límite establecido para este estudio.

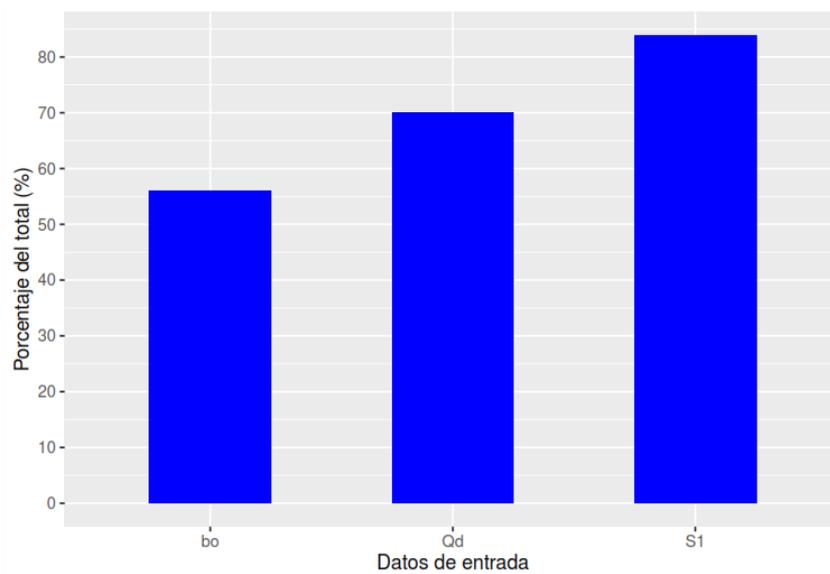


Figura 2: Datos de entrada (%) del total

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4 RESULTADOS

Se consideró la pendiente del terreno para definir las dimensiones constructivas de la huella y la contrahuella. Para un ángulo de inclinación de $\theta = 50.2$ (°) se obtuvo un valor de la contrahuella de $h = 1.00$ (m) y huella de $l = 0.80$ (m).

A partir de los datos de entrada de mostrados en la Tabla 1 se obtuvieron los siguientes valores que se muestran en Tabla 2.

Tabla 2: Valores calculados

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	35.00	(m^3/s)
Caudal unitario	q	12.50	($m^3/s/m$)
Calado crítico	y_c	2.52	(m)
Relacion H_s/y_c	H_s/y_c	6.56	(—)
Calado normal	y_n	0.59	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Tabla 3 se muestran los valores calculados de las pérdidas de energía en la rápida escalonada.

Tabla 3: Valores de las pérdidas

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Energía al inicio de la rápida	E_1	18.18	(m)
Pérdida de energía	ΔE	2.13	(m)
Energía al pie de la rápida	E_2	16.05	(m)
% de pérdidas	$\Delta E\%$	11.72	(%)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4.1 Comprobación de flujo rasante

La comprobación para flujo FRAS se la realizó con la ecuación del límite inferior para flujo rasante.

En la Figura 3 se puede observar el tipo de flujo con relación a la curva del límite para flujo FRAS para una relación ($h/l = 1.25$) y ($y_c/h = 2.52$).

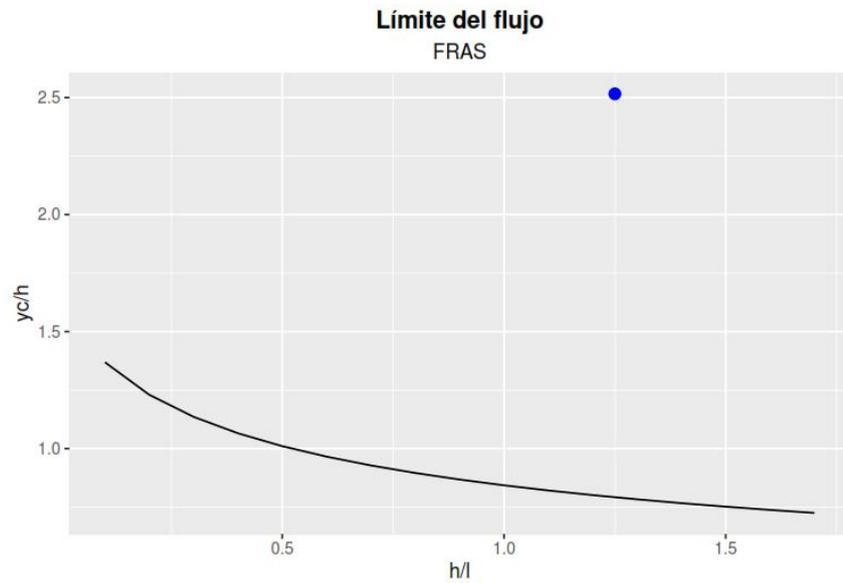


Figura 3: Límite de flujo

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4.2 Esquema de los escalones

La rápida escalonada tiene un total de No.16 escalones. En la Figura 4 se muestra un esquema de los escalones.

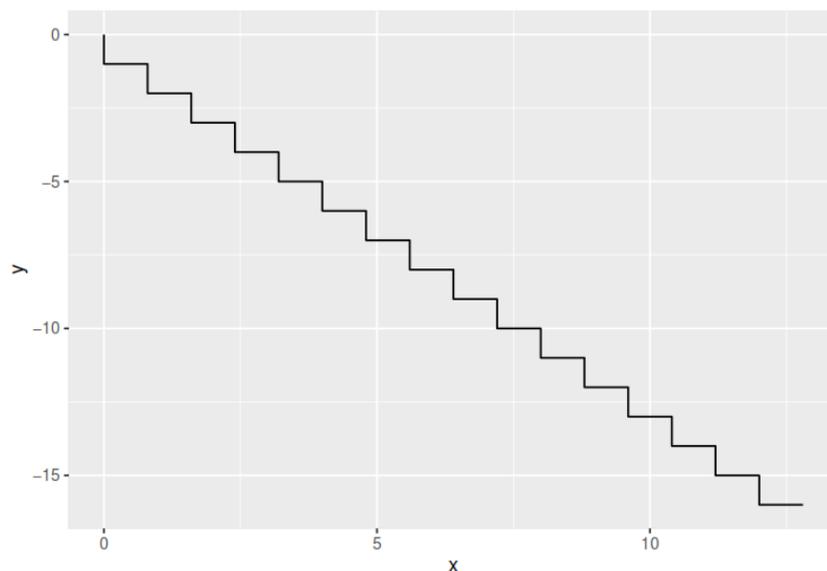


Figura 4: Número de escalones en la rápida

Elaborado por: Daniel Campaña E.

La pendiente de diseño de la rápida en este caso coincide con la pendiente del terreno y la dimensión de los escalones guarda la misma relación $(h/l)=\text{pendiente}$. En la Tabla 4 se muestra las dimensiones constructivas de los escalones.

Tabla 4: Dimensiones de los escalones

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Altura de la contrahuella	h	1.0	(m)
Longitud de la huella	l	0.8	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 5 se puede observar la relación de aspecto de los escalones de la rápida para flujo rasante.

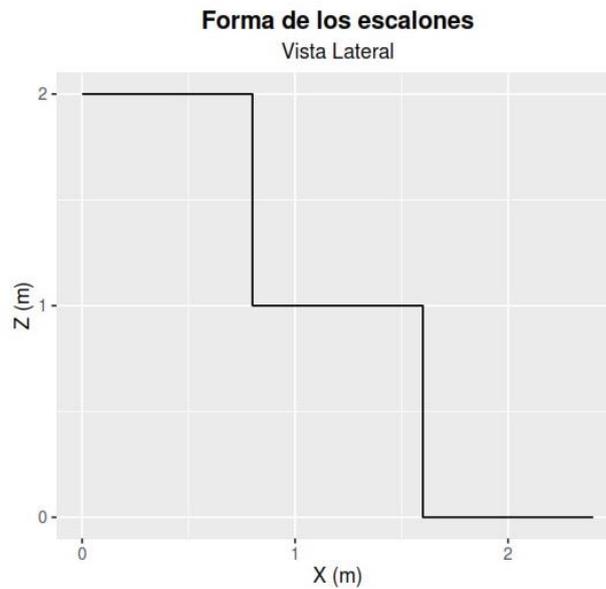


Figura 5: Relación de aspecto de los escalones

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Archivo adjunto

Posterior a los cálculos realizados se generó un archivo en formato (.xlsx) que contiene un conjunto de pares ordenados que permite generar un esquema básico de los escalones del dissipador. Estos grupos de datos pueden ser insertados en autocad como polilínea. Los pares ordenados que conforman este esquema del dissipador se encuentran en el archivo adjunto de nombre: "**Rapida_cad.xlsx**"

5 REFERENCIAS

- Andrade, A., Schulz, H., Lobosco, R., & Porto, R. (2012). *Stepped spillways: Theoretical, experimental and numerical studies*. Hydrodynamics - Natural Water Bodies.
- Castillón Rosero, C. D., & Tipán Tipán, W. A. (2023). *Análisis CDF del porcentaje de disipación de energía en rápidas escalonadas con flujo rasante para caudales pluviales de las zonas norte, centro y sur de la ciudad de Quito*. [Tesis de Grado]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Editorial: Marcel Dekker.
- Rosado Cantillo, G. A. (2017). *Metodología para el diseño de canales escalonados, disipadores de energía empleados en drenaje urbano, basada en modelación física*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

DISIPADOR DE ENERGÍA CON DESCARGADOR A VÓRTICE

MEMORIA DE CÁLCULO

DANIEL CAMPAÑA E.

20 / 02 / 2024

Índice

1	INTRODUCCIÓN	3
1.1	Funcionamiento de la Estructura	3
1.2	Esquema del Disipador	3
2	ECUACIONES UTILIZADAS	5
2.1	Componentes del Disipador	5
2.1.1	Colector de aproximación (zona 0)	5
2.1.2	Cámara de entrada (zona 1)	6
2.1.3	Pozo vertical (zona 2)	7
2.1.4	Cámara de disipación (zona 3)	8
2.2	Capacidad de la Estructura	9
3	DATOS DE ENTRADA	10
4	RESULTADOS	11
4.1	Colector de Aproximación	11
4.2	Pozo Vertical	12
4.3	Cámara de Entrada	12
4.4	Cámara de Disipación	14
4.5	Capacidad de la Estructura	15
5	REFERENCIAS	17

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Funcionamiento de la Estructura

El descargador a vórtice es una estructura de disipación de energía hidráulica, la cual induce al flujo a un movimiento helicoidal a través de un pozo vertical. La disipación ocurre por la fricción del flujo en las paredes del pozo formándose en todo momento un núcleo de aire el cual garantiza que las presiones del flujo no varíen significativamente.

El dimensionamiento del disipador con descargador a vórtice se basa en el tipo de régimen del flujo de aproximación. El parámetro que define el tipo de régimen del flujo se denomina Número de Froude (Fr). Se recomienda que para flujo subcrítico el número de Froude sea menor a 0.75 y para flujo supercrítico sea mayor a 1.30.

El análisis contempla flujo uniforme en una dirección por lo que son válidas las ecuaciones básicas de la hidráulica como la ecuación de continuidad, la ecuación de Manning, la ecuación de Darcy-Weisbach, por citar algunas.

1.2 Esquema del Disipador

Debido a que el disipador en su totalidad consta de cinco zonas bien definida resulta conveniente realizar una división de las mismas. Estas divisiones están numeradas según el recorrido del flujo a través del disipador. Como la mayoría de variables en el colector de aproximación tiene subíndice cero se optó por empezar la numeración en dicho valor.

En la Tabla 1 se muestra la división por zonas del disipador con descargador a vórtice.

Tabla 1: Zonas del descargador a vórtice

COMPONENTE	ZONA
Colector de aproximación	0
Cámara de entrada	1
Pozo vertical	2
Cámara de disipación	3
Colector de salida	4

Elaborado por: Daniel Campaña E.

La numeración de las zonas empieza en 0 por facilidad de mantener los subíndices de las variables. En la Figura 1 se muestran las zonas correspondientes al descargador a vórtice.

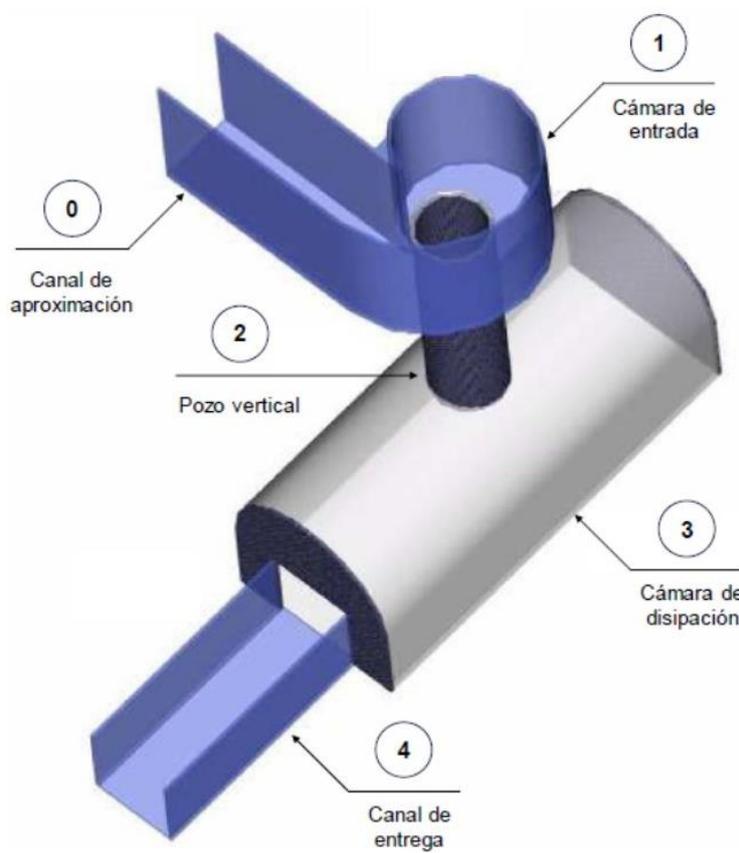


Figura 1: Esquema del descargador a vórtice
Fuente: (Haro & Jara, 2006)

2 ECUACIONES UTILIZADAS

2.1 Componentes del Disipador

El orden de las ecuaciones van acorde al sentido del flujo a través de los componentes del disipador. Cabe mencionar que este no necesariamente es el orden de los cálculos.

2.1.1 Colector de aproximación (zona 0)

En el colector de aproximación hacia la cámara de entrada se requiere conocer las características hidrodinámicas del flujo. A partir del caudal de diseño (Q_d) y la geometría del colector se utiliza la ecuación de Manning para hallar el calado (y_0) y la velocidad media del flujo (V_0).

La velocidad media del flujo se estima con la ecuación de Manning que es válida para flujo uniforme turbulento e hidráulicamente rugoso (ESP, 2013, p. 54). Esta fórmula utiliza datos geométricos de la sección y el coeficiente de Manning (n) que depende del tipo de material de la sección del canal.

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

V : Velocidad media del flujo de aproximación. (m/s)

n : Coeficiente de rugosidad de Manning.

R_h : Radio hidráulico de la sección transversal. (m)

S_0 : Pendiente longitudinal del canal. (m/m)

Número de Froude (F_r)

El número de Froude es un parámetro que representa el efecto de la gravedad sobre un flujo el cual relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales. Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$$

Donde:

F_r : Número de Froude.

V : Velocidad media del flujo. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

d : Profundidad hidráulica. (m)

Profundidad hidráulica (d)

La profundidad hidráulica es la relación entre el área hidráulica de la sección transversal (A_h) y el ancho superficial (T). Este parámetro se lo puede hallar con la siguiente ecuación.

$$d = \frac{A_h}{T}$$

Donde:

d : Profundidad hidráulica. (m)

A_h : Área hidráulica. (m^2)

T : Ancho superficial. (m)

Nota: El ancho superficial (T) en canales rectangulares es igual al ancho del canal (b_0) y la profundidad hidráulica (d) es igual al calado de la sección (y_0).

2.1.2 Cámara de entrada (zona 1)

La cámara de entrada se encuentra ubicada luego del colector de aproximación, tiene forma helicoidal y sus dimensiones geométricas dependen del tipo de flujo en el colector según la gravedad, es decir, si el flujo es subcrítico o supercrítico.

Radio al eje del colector (a)

Este parámetro mide la distancia desde el centro del pozo vertical al eje del colector de aproximación. Este valor varía según el régimen del flujo de aproximación.

$$\begin{aligned} a &= 0.5 \cdot (D_s + b_0) + \Delta R + c_{sb} + s \implies \text{Flujo subcrítico} \\ a &= 0.5 \cdot D_s + b_0 + s_1 \implies \text{Flujo supercrítico} \end{aligned}$$

Donde:

a : Radio al eje del colector. (m)

D_s : Diámetro del tubo vertical. (m)

b_0 : Ancho del colector de aproximación. (m)

ΔR : Radio del chaflán al inicio del pozo vertical. (m)

c_{sb} : Distancia constructiva. (m)

s : Distancia constructiva. (m)

s_1 : Distancia constructiva. (m)

Para flujo subcrítico se debe cumplir la condición " $1 \leq a/D_s \leq 1.25$ ", caso contrario se debe modificar los siguientes datos: ($b_0, \Delta R, c, s, D_s$).

Para flujo supercrítico esta relación será " $(0.5D_s + s + c) \leq a/D_s \leq (1.5D_s + s)$ ", de lo contrario se debe modificar: (b_0, s_1, D_s). Además para este tipo de flujo se debe hacer dos comprobaciones adicionales, la primera que " $0.4D_s \leq b \leq D_s$ " y el segundo que " $0.4D_s \leq c \leq D_s$ ", si no se cumple alguna de las dos condiciones se debe cambiar el valor de (D_s) adoptado.

Centros y radios de curvatura

Para la cámara de entrada tipo caracol tanto los centros y radios de curvatura se calculan dependiendo del tipo de flujo en el colector de aproximación.

Los valores de los centros de curvatura son:

$$e = \frac{b_0 + s}{7} \implies \text{Flujo subcrítico}$$

$$\left. \begin{array}{l} e_1 = a - R_1 \\ e_2 = 0.5D_s + s + c_{sp} - R_2 \\ e_3 = a - b_0 - R_3 \end{array} \right\} \implies \text{Flujo supercrítico}$$

Donde:

e : Centros de curvatura. (m)

b_0 : Ancho del colector de aproximación. (m)

s : Distancia constructiva. (m)

a : Radio al eje del canal. (m)

R : Radios de curvatura. (m)

D_s : Diámetro del tubo vertical. (m)

c_{sp} : Distancia constructiva en flujo supercrítico. (m)

2.1.3 Pozo vertical (zona 2)

El pozo vertical permite transferir el flujo en sentido vertical desde la cámara de entrada hasta la cámara de disipación. En la parte superior del pozo existe un chaflán con radio (ΔR) que suaviza el contorno del fondo del colector para mantener la continuidad de las líneas de corriente (Chiluisa & Guanoluisa, 2015).

El flujo helicoidal dentro del pozo vertical forma un núcleo de aire en su centro, lo que garantiza que la caída es estable y libre de fluctuaciones de profundidad y presión. El factor de seguridad (η) para el cálculo del diámetro del pozo (D_s) toma valores entre 0.83 y 2, estudios realizados en laboratorio recomiendan usar un factor de seguridad (η) de 1.25 (Haro & Jara, 2006). El diámetro del pozo se lo puede calcular mediante la siguiente ecuación.

$$D_s = \eta \cdot \left(\frac{Q_d^2}{g} \right)^{1/5}$$

Donde:

D_s : Diámetro del pozo vertical. (m)

η : Factor de seguridad.

Q_d : Caudal de diseño. (m^3/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

Nota: El diámetro calculado (D_s) es un valor mínimo y puede ser ajustado a una dimensión constructiva.

2.1.4 Cámara de disipación (zona 3)

Se encuentra ubicada al pie del pozo vertical y sirve para disipar la energía residual del flujo. Es el componente de mayor tamaño del disipador. Se recomienda las siguientes dimensiones para la cámara de disipación, las cuales son función de diámetro del tubo vertical.

$$4 \leq \frac{S_t}{D_s} < 6 \quad 2 \leq \frac{B_t}{D_s} < 3 \quad 2 \leq \frac{T_t}{D_s} < 3$$

Donde:

S_t : Longitud de la cámara. (m)

B_t : Ancho de la cámara. (m)

T_t : Altura de la cámara. (m)

D_s : Diámetro del pozo vertical. (m)

2.2 Capacidad de la Estructura

El caudal máximo que puede circular por el dissipador con descargador a vórtice se lo puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_0 = \left[\frac{g \cdot a}{b_0} \cdot \left(\frac{D_s}{2} \right)^5 \right]^{1/2}$$

Donde:

Q_0 : Caudal de diseño. (m^3/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

a : Diámetro externo. (m)

b_0 : Ancho del colector de aproximación. (m)

D_s : Diámetro del tubo vertical. (m)

Profundidad del flujo (h)

La profundidad del flujo en la cámara de disipación se calcula mediante el ajuste de la curva de descarga que está definida por la siguiente ecuación:

$$h = h_o \cdot \left(0.687 \cdot \frac{Q_d}{Q_o} + 0.18 \right)$$

Donde:

h : Profundidad del flujo en la cámara de disipación. (m)

h_o : Profundidad referencial. (m)

Q_d : Caudal de diseño. (m^3/s)

Q_o : Caudal referencial. (m^3/s)

3 DATOS DE ENTRADA

Los datos utilizados para el dimensionamiento del dissipador se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos de entrada

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	0.800	(m^3/s)
Ancho del colector de aproximación	b_0	0.850	(m)
Factor de seguridad (eta)	η	1.250	$(-)$
Pendiente longitudinal del colector	S_0	0.005	(m/m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 2 se muestran los datos de entrada dentro de los límites establecidos. Si estos datos son mayores al 100% significa que superaron el límite establecido para este estudio.

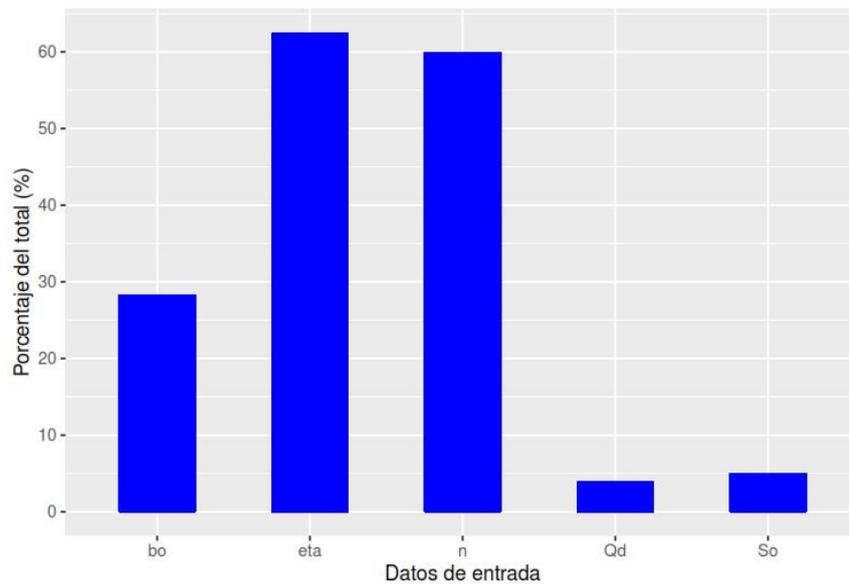


Figura 2: Datos de entrada (%) del total

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4 RESULTADOS

4.1 Colector de Aproximación

En el colector de aproximación se utiliza la fórmula de Manning para el cálculo del calado y la velocidad media de la sección transversal.

En la Tabla 3 se muestra el resumen de los valores de las características hidrodinámicas del flujo de aproximación.

Tabla 3: Valores calculados del colector de aproximación

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	0.80	(m^3/s)
Calado	y_0	0.52	(m)
Velocidad media	V_0	1.79	(m/s)
Número de Froude	F_r	0.79	$(-)$

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Tabla 4 se muestran los valores complementarios de la sección transversal del colector aguas arriba de la cámara de entrada.

Tabla 4: Valores complementarios del colector

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal unitario	q_0	0.94	$(m^3/s/m)$
Área hidráulica	A_h	0.45	(m^2)
Perímetro mojado	P_m	1.90	(m)
Radio hidráulico	R_h	0.23	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4.2 Pozo Vertical

El diámetro del pozo vertical (D_s) se calcula antes que los valores de la cámara de entrada debido a que sus parámetros dependen directamente de este valor como se puede observar en la sección (2.1.2) de este reporte.

Si es necesario se procederá a redondear o escoger una dimensión constructiva para el diámetro del tubo vertical. A continuación se muestran estos diámetros:

Tabla 5: Valores calculados del pozo vertical

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del pozo calculado	$D_{s_{cal}}$	0.724	(m)
Diámetro del pozo asumido	D_s	0.700	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4.3 Cámara de Entrada

Para diseñar la cámara de entrada se tomó en cuenta el tipo de régimen del flujo en el colector. A partir de los datos de entrada se calcula el número de Froude que permite definir el tipo de régimen del flujo de aproximación.

Tabla 6: Dimensiones constructivas: flujo subcrítico

DESCRIPCION	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Dimensión constructiva	ΔR	0.02	(m)
Dimensión constructiva	c_{sb}	0.02	(m)
Dimensión constructiva	s	0.02	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Tabla 7 se muestra el resumen de los valores calculados en la cámara de entrada para flujo: **subcrítico**.

Tabla 7: Valores calculados de la cámara de entrada

DESCRIPCION	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Diámetro del pozo vertical	D_s	0.70	(m)
Dimensión (a)	a	0.84	(m)
Dimensión (e)	e	0.12	(m)
Radio 1	R_1	1.11	(m)
Radio 2	R_2	0.87	(m)
Radio 3	R_3	0.63	(m)
Radio 4	R_4	0.51	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

A continuación se muestran un esquema básico de la vista en planta de la cámara de entrada para flujo subcrítico:

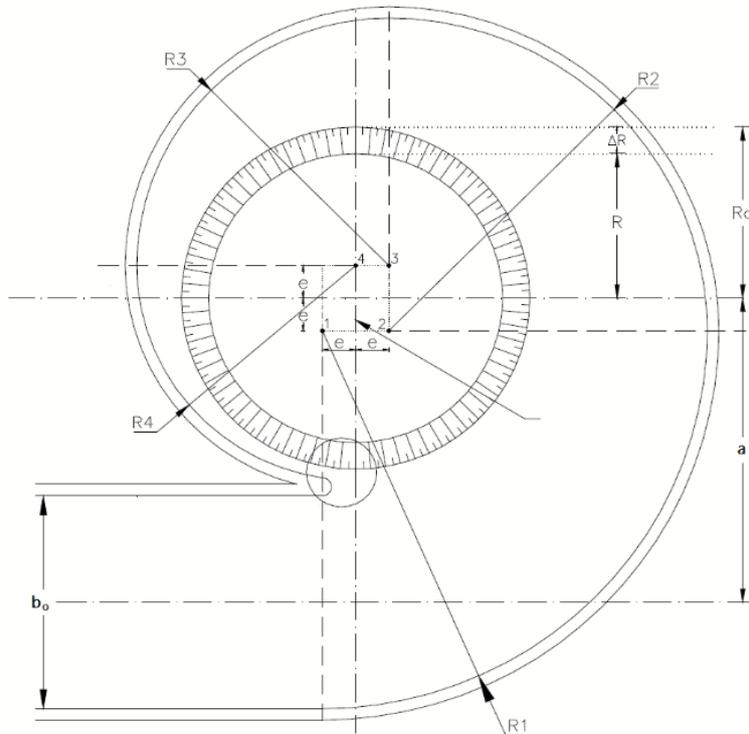


Figura 3: Vista en planta

Fuente: (Haro & Jara, 2006)

En la Figura 4 se puede observar un esquema de la vista en elevación de la cámara de entrada para flujo subcrítico:

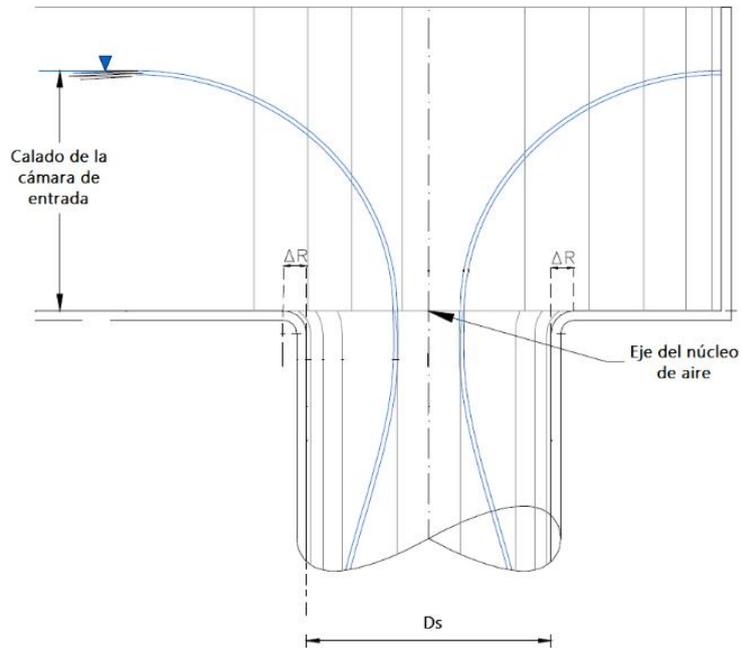


Figura 4: Vista en elevación

Fuente: (Haro & Jara, 2006)

4.4 Cámara de Disipación

Para el dimensionamiento de la cámara de disipación se han tomado los límites máximos de la Sección 2.1.4 y los valores se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Valores calculados de la cámara de disipación

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Longitud de la cámara	S_t	4.2	(m)
Ancho de la cámara	B_t	2.1	(m)
Altura de la cámara	T_t	2.1	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 5 se muestra un esquema de la vista frontal de la cámara de disipación.

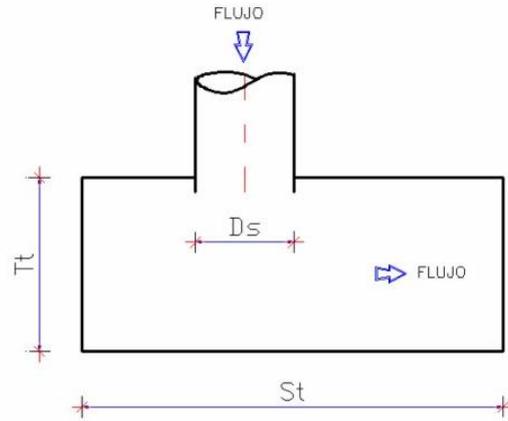


Figura 5: Vista superior de la cámara de disipación

Fuente: (Haro & Jara, 2006)

En la Figura 6 se muestra un esquema de la vista frontal de la cámara de disipación.

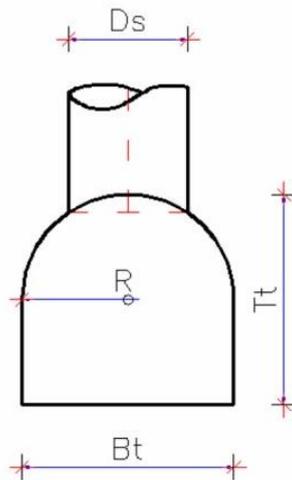


Figura 6: Vista frontal de la cámara de disipación

Fuente: (Haro & Jara, 2006)

4.5 Capacidad de la Estructura

El disipador con descargador a vórtice para flujo helicoidal tiene una capacidad máxima que se ha calculado con las expresiones de la sección 2.2.

Los valores máximos de la capacidad de la estructura se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Resultados

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal referencial	Q_o	0.226	(m^3/s)
Caudal máximo	Q_{max}	1.303	(m^3/s)
Relación de caudales	Q_d/Q_o	3.545	(—)
Profundidad referencial	h_o	0.346	(m)
Profundidad del flujo en la cámara	h	0.905	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Archivo adjunto

Posterior a los cálculos realizados se generó un archivo en formato (.xlsx) que contiene un conjunto de pares ordenados que permite generar un esquema básico de los radios de curvatura de la cámara de entrada. Estos grupos de datos pueden ser insertadas en autocad como polilíneas una columna a la vez. Los pares ordenados que conforman estos esquemas del dissipador se encuentran en el archivo adjunto de nombre: "**Vortice_cad.xlsx**"

5 REFERENCIAS

- Chiluisa, C., & Guanoluisa, C. (2015). *Verificación del diseño hidráulico de un dissipador de energía tipo vórtice mediante modelo físico construido en laboratorio*. [Tesis de Grado]. Universidad Central del Ecuador.
- ESP. (2013). *Normas de diseño de sistemas de alcantarillado de las empresas públicas de Medellín*. [Norma Técnica]. Colombia.
- Haro, P., & Jara, M. F. (2006). *Manual básico de diseño de estructuras de cambio de nivel y cambio de dirección con flujo a gravedad*. [Tesis de Grado]. Escuela Politécnica Nacional. Repositorio Digital - EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2507>

DISIPADOR DE ENERGÍA CON POZO DE BANDEJAS

MEMORIA DE CÁLCULO

DANIEL CAMPAÑA E.

20 / 02 / 2024

Índice

1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Funcionamiento de la Estructura	3
1.2 Esquema del Disipador	3
2 ECUACIONES UTILIZADAS	5
2.1 Componentes del Disipador	5
2.1.1 Conducto de Aproximación	5
2.1.2 Pozo de disipación	6
2.1.3 Cámara disipadora al pie	8
2.2 Condiciones para usar bandejas inclinadas	8
3 DATOS DE ENTRADA	10
4 RESULTADOS	11
4.1 Conducto de aproximación	11
4.2 Pozo de Bandejas	12
5 REFERENCIAS	15

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Funcionamiento de la Estructura

El pozo de bandejas es un disipador de energía hidráulica que se encarga de llevar el flujo desde un nivel superior hasta uno inferior a través de rejillas en las bandejas las cuales se ubican de forma alternada entre sí. Esto permite generar la disipación gradual de la energía conforme el flujo pasa a la bandeja inferior.

Una de las condiciones para implementar este disipador es que el flujo en el canal de aproximación debe ser subcrítico. De no cumplirse esta condición se debe construir una estructura de cambio de régimen aguas arriba de la entrada al pozo. Se recomienda que el número de Froude ($F_r < 0.9$) (Haro & Jara, 2006, p. 98).

La primera bandeja del pozo es la continuación del canal de aproximación y tendrá una relación largo-ancho $l/b = 2$. A partir de la segunda bandeja se considerará una inclinación del 5% que equivale a 3° aproximadamente. El número de bandejas debe ser impar sin contar la primera, de modo que la última bandeja descargue el flujo en la parte posterior del pozo de alivio para evitar acumulación de sedimentos en esa zona.

Se debe construir un chaflán a 45° en la parte posterior de la cámara de disipación. La energía residual se disipa en el colchón de agua que se forma en la base del pozo antes de entregar el flujo al colector de salida (Villamarín, 2013).

Esta estructura de disipación de energía no es muy recomendable debido a que requiere de mantenimiento para evitar taponamientos y mantener la eficiencia hidráulica de diseño. Sin embargo posee facilidad constructiva y no requiere de mucho espacio.

1.2 Esquema del Disipador

El disipador de energía con pozo de bandejas consta de los siguientes elementos:

- Canal de aproximación: El cual puede o no tener cambio de sección para pasar de flujo supercrítico a subcrítico.
- Pozo de bandejas: Debe tener un número impar de bandejas intercalando las rejillas.
- Cámara de disipadora: Disipa la energía residual.
- Colector de salida: Debe tener un flujo estable.

En la Figura 1 se puede observar el esquema de un pozo de bandejas inclinadas con sus elementos.

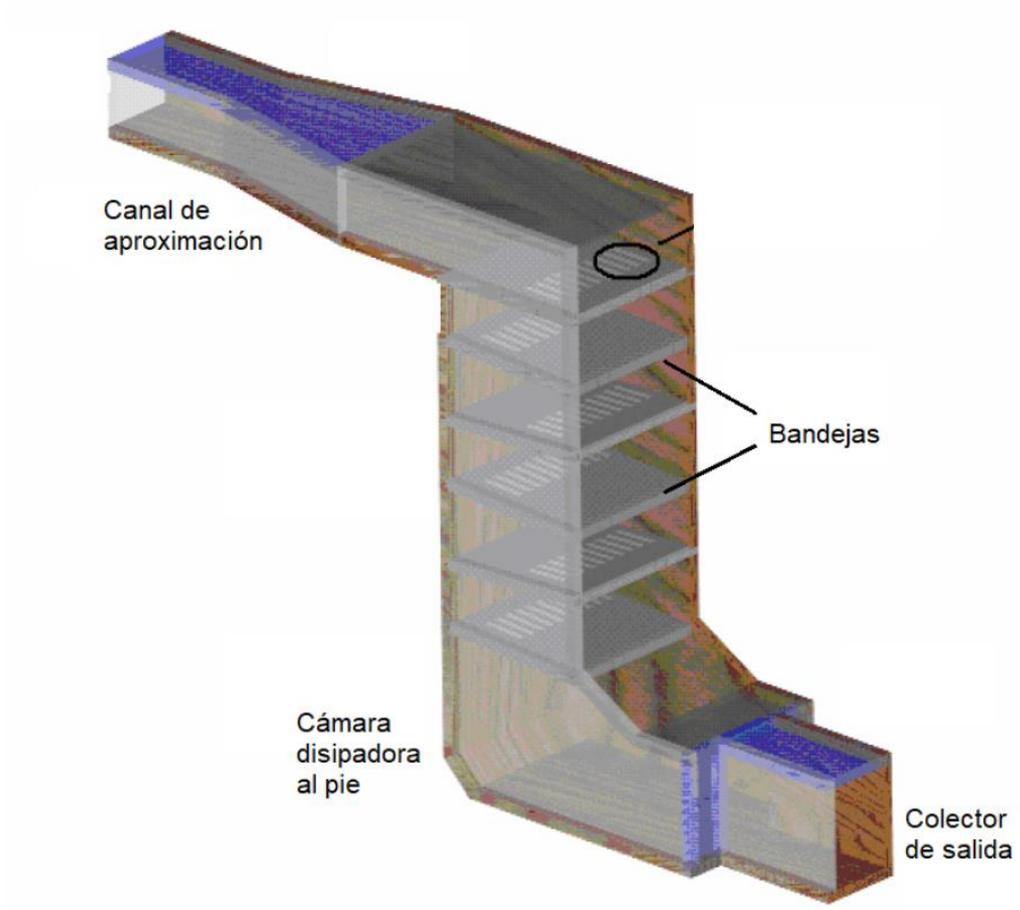


Figura 1: Esquema del pozo de bandejas
Fuente: (Haro & Jara, 2006)

2 ECUACIONES UTILIZADAS

2.1 Componentes del Disipador

Las ecuaciones utilizadas se presentan siguiendo el sentido del flujo a través de la estructura, desde el conducto de aproximación hasta la cámara de disipación.

2.1.1 Conducto de Aproximación

Los parámetros hidrodinámicos del flujo de aproximación se estimaron a partir de los datos de entrada y de la Ecuación de Manning la cual considera flujo uniforme para el cálculo de la velocidad media. Posteriormente se calculó el número de Froude (F_r) para verificar que se tiene flujo subcrítico.

Ecuación de Manning

La ecuación de Manning es una fórmula empírica que permite estimar la velocidad media del flujo a partir de las propiedades geométricas de la sección transversal y la pendiente del canal. Además se utiliza el coeficiente de Manning (n) que depende del tipo de material del canal. Esta fórmula es aceptable para valores intermedios de rugosidad relativa y pierde efectividad para valores bajos del número de Reynolds ya que no considera efectos de viscosidad (Rocha, 2007, p. 266).

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S_0^{1/2}$$

Donde:

V : Velocidad media del flujo de aproximación. (m/s)

n : Coeficiente de rugosidad de Manning.

R_h : Radio hidráulico de la sección transversal. (m)

S_0 : Pendiente longitudinal del canal. (m/m)

Número de Froude (F_r)

Este parámetro representa el efecto de la gravedad sobre un flujo. Relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales. Se lo calcula con la siguiente ecuación:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$$

Donde:

F_r : Número de Froude.

V : Velocidad media del flujo. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s^2)

d : Profundidad hidráulica. (m)

Nota: La profundidad hidráulica es igual al área hidráulica dividida para el ancho superficial ($d=A/T$).

2.1.2 Pozo de disipación

El pozo de disipación es un elemento de sección transversal rectangular, está conformado por las bandejas horizontales o inclinadas con las rejas alternadas de una bandeja superior a una inferior.

Ecuación general del pozo de bandejas (L_i)

Las dimensiones de las bandejas se calculan en función del caudal de diseño (Q_d) con la ecuación general para el dimensionamiento de las bandejas. Esta ecuación se muestra a continuación.

$$L_i = 0.142 \cdot K \cdot Q_d^{2/5}$$

Donde:

L_i : Longitud del pozo. (m)

K : Constante de dimensionamiento para cada (L_i).

Q_d : Caudal de diseño. (lt/s)

Nota: Las longitudes (L_i) de las bandejas se calculan a partir del coeficiente (K) del elemento al que corresponde según la Tabla 1.

Tabla 1: Constantes K de los parámetros geométricos de las bandejas

Li	Descripción	K
A	Ancho del pozo	1.00
B	Separación de la pared frontal a la reja	0.19
C	Largo de la reja	0.26
D	Separación entre pared lateral y reja	0.05
E	Ancho de la reja	0.046
H	Altura entre bandejas	0.75

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Fuente: (Haro & Jara, 2006)

Los valores obtenidos de la Tabla 1 y la ecuación general para el dimensionamiento de las bandejas no deben ser menores a las dimensiones mínimas de la Tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones mínimas de bandejas

Li	Descripción	Dimensión mínima (m)
A	Ancho del pozo	3.30
B	Separación de la pared frontal a la reja	0.53
C	Largo de la reja	1.02
D	Separación entre pared lateral y reja	0.24
E	Ancho de la reja	0.15
H	Altura entre bandejas	1.65

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Fuente: (Haro & Jara, 2006)

Nota: Las dimensiones mínimas de la Tabla 2 son válidas para caudales de diseño de hasta ($Q_d < 2.6 \text{ m}^3/\text{s}$).

2.1.3 Cámara disipadora al pie

Al pie del pozo de bandejas se ubica una cámara disipadora la cual tendrá una altura mínima un 20% más que la separación entre bandejas bandejas. Por lo tanto la altura mínima de la cámara de disipadora será:

$$H_{min} = 1.20 \cdot H$$

Donde:

H : Separación entre bandeja. (m)

H_{min} : Altura mínima de la cámara de disipación. (m)

Adicionalmente, se recomienda aumentar la altura de la cámara una longitud (H_2) que formará un chaflán de 45° para tener una altura total que esté en un rango entre:

$$1.20 \cdot H < H_T < 2.0 \cdot H$$

Donde:

H : Altura entre bandejas. (m)

H_T : Altura de la cámara de disipación. (m)

2.2 Condiciones para usar bandejas inclinadas

En el diseño de un pozo de bandejas con una inclinación del 5% se deben hacer ciertas consideraciones las cuales se muestran a continuación:

- a) La relación largo-ancho de la bandeja es igual a dos.

$$L = 2 \cdot B$$

Donde:

L : Longitud de bandeja. (m)

B : Ancho de bandeja. (m)

- b) La relación entre el área de la bandeja y el área de los orificios es del 14%.

c) La relación entre las dimensiones B y C.

$$\frac{B}{C} = \frac{0.19}{0.26}$$

Donde:

B: Distancia más corta del borde de la reja al extremo de la bandeja. (*m*)

C: Longitud de la reja. (*m*)

d) La inclinación de las bandejas a partir de la segunda es de 3° que equivale a una pendiente del 5%.

3 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada usados para el dimensionamiento del dissipador con pozo de bandejas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3: Datos de entrada

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	0.80	(m^3/s)
Ancho del canal de aproximación	b_0	0.85	(m)
Desnivel entre colectores	H_s	7.00	(m)
Pendiente de las bandejas	J_1	0.05	(m/m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 2 se muestran los datos de entrada dentro de los límites establecidos. Si estos datos son mayores al 100% significa que superaron el límite establecido para este estudio.

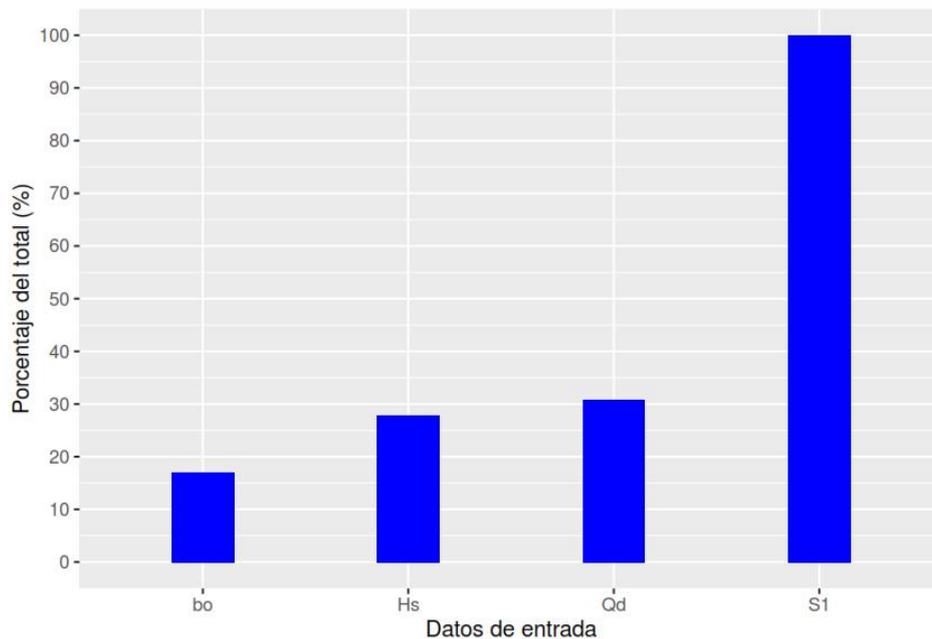


Figura 2: Datos de entrada (%) del total

Elaborado por: Daniel Campaña E.

4 RESULTADOS

4.1 Conducto de aproximación

A partir de los datos de entrada y utilizando la ecuación de Manning se calcularon las características hidrodinámicas del flujo de aproximación que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores calculados del colector de aproximación

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal de diseño	Q_d	0.80	(m^3/s)
Calado	y_0	0.52	(m)
Velocidad media	V_0	1.79	(m/s)
Número de Froude	F_r	0.79	$(-)$

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Como se mencionó anteriormente el dissipador con pozo de bandejas se aplica para flujo subcrítico y en este caso se determinó que: **Cumple la condición de flujo subcrítico.**

4.2 Pozo de Bandejas

Se definió un número de bandejas **impar** igual a 3 a partir de la segunda bandeja. En la Tabla 5 se puede observar las dimensiones de las bandejas en planta.

Tabla 5: Dimensiones en planta

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Número de bandejas	N	3.00	(#)
Ancho de bandejas	b	0.85	(m)
Longitud de bandejas	L	1.70	(m)
Separación de la pared frontal a la reja	B	0.50	(m)
Largo de la reja	C	1.00	(m)
Separación entre la pared lateral y la reja	D	0.20	(m)
Ancho de la reja	E	0.10	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En la Figura 3 se muestra un esquema de la ubicación de las dimensiones en las bandejas.

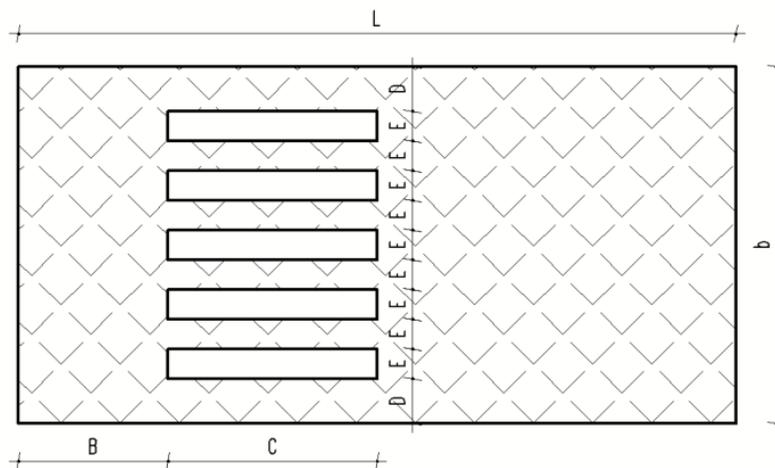


Figura 3: Dimensiones de bandeja
Elaborado por: Daniel Campaña E.

Considerando la primera bandeja se tiene un total de **4**, con una separación de 1.6 (m) entre cada una, las dimensiones en elevación obtenidas se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Dimensiones en elevación

VARIABLE	SIMBOLO	VALOR	UNIDAD
Desnivel entre colectores	H_s	7.0	(m)
Altura entre bandejas	H	1.6	(m)
Altura total calculada	H_t	6.7	(m)
Dimensión constructiva	H_2	0.3	(m)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

En el esquema de la Figura 4 se muestra la ubicación de las dimensiones en planta obtenidas para el pozo de bandejas.

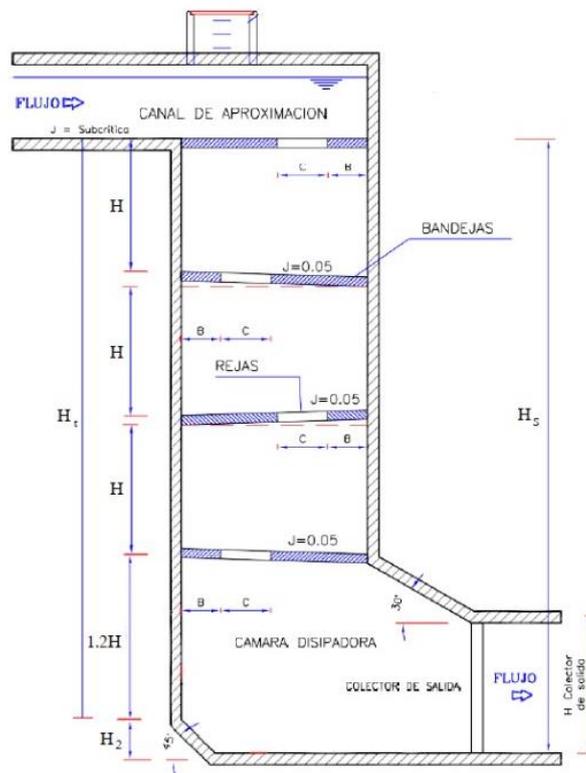


Figura 4: Esquema del pozo de bandejas
Fuente: (Haro & Jara, 2006)

Archivo adjunto

Posterior a los cálculos realizados se generó un archivo en formato (.xlsx) que contiene un conjunto de pares ordenados que permite generar un esquema básico de la vista lateral del disipador. Estos grupos de datos pueden ser insertados en autocad como polilíneas una columna a la vez. Los pares ordenados que conforman este esquema del disipador se encuentran en el archivo adjunto de nombre: "**Bandejas_cad.xlsx**"

5 REFERENCIAS

- Haro, P., & Jara, M. F. (2006). *Manual básico de diseño de estructuras de cambio de nivel y cambio de dirección con flujo a gravedad*. [Tesis de Grado]. Escuela Politécnica Nacional. Repositorio Digital - EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2507>
- Rocha, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*.
- Villamarín, S. (2013). *Manual básico de diseño de estructuras de disipación de energía hidráulica*. [Tesis de Grado]. Escuela Politécnica del Ejército.

Anexo II. Manual de usuario

Manual de Usuario

DDissipator v1.0

Autor: Daniel Campaña E.

Febrero, 2024

ÍNDICE

DDissipator v1.0	1
1. INSTALACIÓN DE PROGRAMAS	1
1.1 Instalación Nueva	2
1.1.1 Instalación de R.....	2
1.1.2 Instalación de RTools	2
1.1.3 Instalación de RStudio.....	3
1.1.4 Instalación de las librerías de R.....	3
1.2 Instalación Antigua	4
2. FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN	4
2.1 Ingreso de Datos.....	5
2.2 Ejecutar la Aplicación	5
3. RESULTADOS OBTENIDOS	5

DDissipator v1.0

DDissipator v1.0 es una aplicación desarrollada para el dimensionamiento de disipadores de energía hidráulica en sistemas de alcantarillado.

El dimensionamiento de estructuras disipadoras de energía requiere de exploración y estudio, el cual toma un tiempo considerable, además que dicha información se encuentra dispersa en la bibliografía, por lo que es conveniente contar con una herramienta que disminuya esos tiempos.

La aplicación DDissipator v1.0 fue desarrollada en el lenguaje de programación R, con el entorno de desarrollo RStudio y el paquete de herramientas RMarkdown. Esta aplicación en su primera versión consta de seis memorias de cálculo con extensión (Rmd), las cuales al ser ejecutados generan un reporte en formato (PDF) del disipador de energía analizado.

1. INSTALACIÓN DE PROGRAMAS

El constante avance de la tecnología hace que los programas tengan nuevas versiones y actualizaciones cada cierto tiempo, por este motivo se buscó una versión estable de los programas instalados, la cual no presente inconvenientes de compatibilidad. Pensado en esto se creó una guía para la instalación de los programas basada en dos consideraciones:

- a) Instalación nueva de los programas, sin tenerlos instalados previamente en el sistema operativo.
- b) Instalación de los paquetes de datos para una versión antigua del programa principal.

1.1 Instalación Nueva

La instalación nueva, es decir, sin tener el programa instalado previamente, contempla cuatro pasos que son:

- Instalación de R
- Instalación del paquete de herramientas R
- Instalación de RStudio
- Instalación de las librerías (packages)

1.1.1 Instalación de R

La versión del programa con la que se realizó la aplicación es: **R 4.3.2**

Se puede descargar directamente de la página de r-project.

Es un software libre con un entorno computacional estadístico y gráfico. Funciona en los sistemas operativos más conocidos.	
Enlace de descarga:	https://www.r-project.org/
<div data-bbox="231 1173 1342 1370" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"><p>Download and Install R</p><p>Precompiled binary distributions of the base system and contributed packages, Windows and Mac users most likely want one of these versions of R:</p><ul style="list-style-type: none">• Download R for Linux (Debian, Fedora/Redhat, Ubuntu)• Download R for macOS• Download R for Windows<p>R is part of many Linux distributions, you should check with your Linux package management system in addition to the link above.</p></div>	

1.1.2 Instalación de RTools

La versión del paquete de herramientas de R instalado es: **RTools 43.5863.5818**

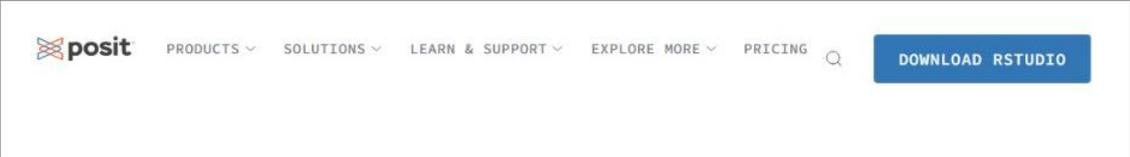
El paquete de herramientas facilita el uso, el manejo y la comunicación de las librerías con R. Este paquete de herramientas debe ser instalado luego de R. Se puede descargar desde el enlace a continuación.

Enlace de descarga:	https://cran.r-project.org/bin/windows/Rtools/
---------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------

1.1.3 Instalación de RStudio

La versión estable que se utilizó es: **RStudio 2023.06.2**

RStudio es un entorno de desarrollo que utiliza el lenguaje de programación base R, cuenta con una interfaz gráfica útil y práctica que agiliza el proceso de programación.

Es un entorno de desarrollo que utiliza lenguaje de programación R.	
Enlace de descarga:	https://posit.co/download/rstudio-desktop/
	

1.1.4 Instalación de las librerías de R

Para instalar las librerías (packages) se debe seguir los pasos a continuación:

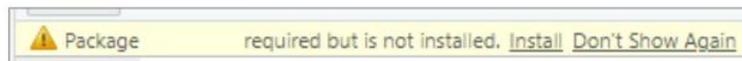
1. Instalar la librería Markdown

```
> install.packages("markdown")
```

2. Instalar la librería RMarkdown

```
> install.packages("rmarkdown")
```

3. Instalar las librerías según la sugerencia que se muestra al abrir una memoria de cálculo (presionar **Install**)



4. Instalar la librería tinytex

```
> install.packages("tinytex")
```

Nota: Revisar si se instaló en el paso anterior, de ser así no es necesario volver a instalarla.

5. Instalar la configuración de tinytex

```
> tinytex :: install_tinytex()
```

- Oprimir el botón Knit para que el programa instale automáticamente la versión actualizada de tlmgr



- La aplicación está lista para funcionar

Nota: Los instaladores de los pasos 1 al 3 se encuentran subidos a la nube en el siguiente enlace:

https://epnecuador-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/daniel_campana_epn_edu_ec/EvGtSs1XDL1KtRVYW2i7-kUBK45gOii-jrEtUEsIJKZrdA?e=fdmSz2

1.2 Instalación Antigua

Para versiones de R y RStudio menores a las señaladas en el capítulo anterior y si se desea evitar una actualización se debe instalar dos paquetes computaciones MikTeX (versión para Windows) y Pandoc.

<p>Para exportar a .pdf instalar una distribución de Látex según el sistema operativo: Windows: MiKTeX Linux: TeXLive Mac: MacTeX</p>	
<p>Descargado de:</p>	<p>https://miktex.org/</p>

2. FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

El usuario puede ejecutar la aplicación desde RStudio abriendo el proyecto desde el directorio “DDISSIPATOR” y haciendo clic en el icono de apertura de la aplicación “DDISSIPATOR.Rproj”.

2.1 Ingreso de Datos

Inmediatamente después del chunk setup, se encuentra el único fragmento de código que debe ser modificado por el usuario, el chunk llamado “**datos-entrada**” desde la línea de código 34, contiene todos los datos iniciales utilizados para generar el reporte y pueden ser modificados por el usuario.

2.2 Ejecutar la Aplicación

Una vez cambiados los datos de entrada se debe ejecutar la aplicación que generará el respectivo reporte del disipador. Para esto se debe hacer clic en el botón Knit que se encuentra en la parte superior del código.



Finalmente, el reporte se generará y abrirá automáticamente en formato (.pdf).

3.RESULTADOS OBTENIDOS

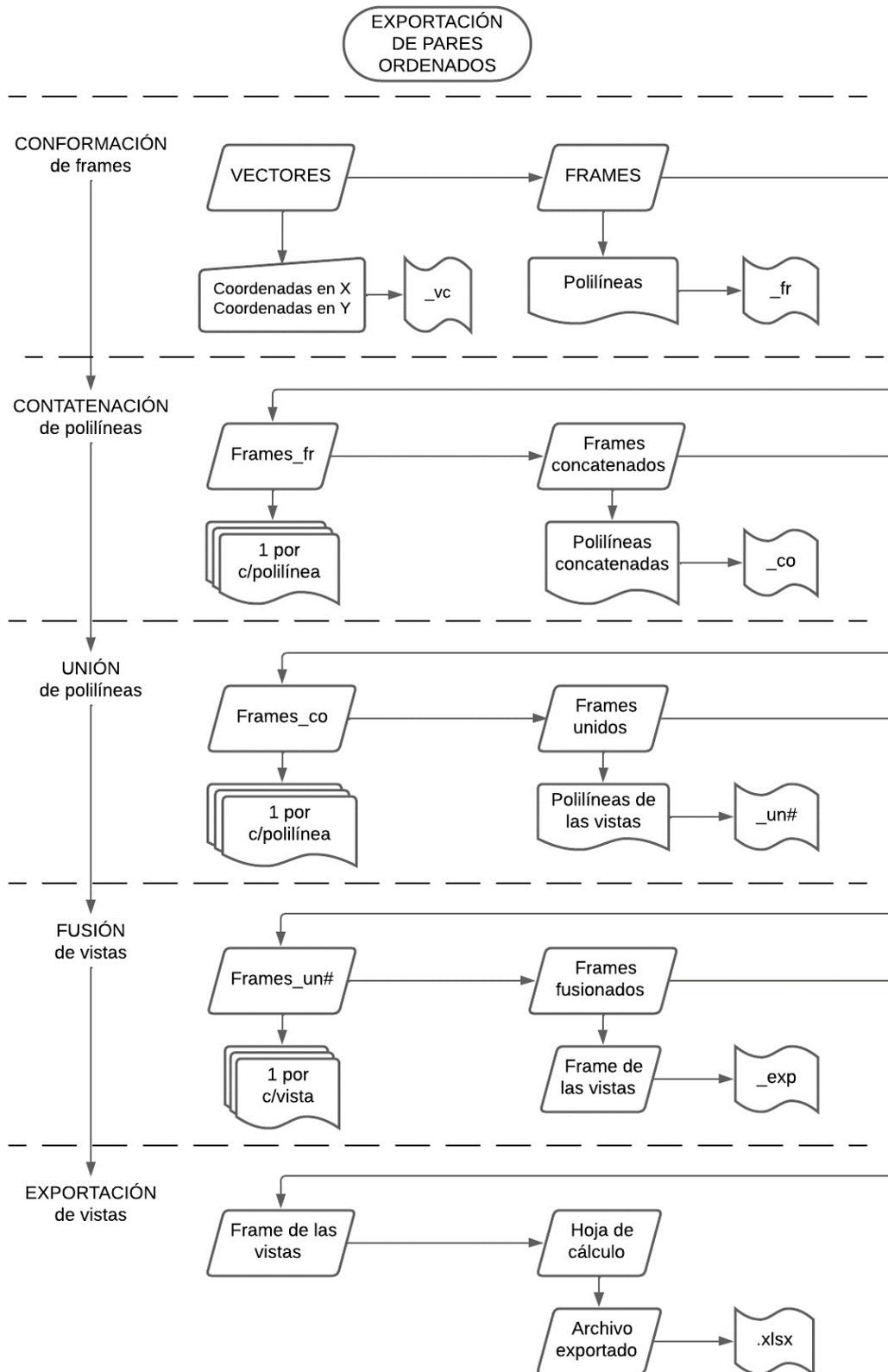
Los resultados se presentarán en memorias de cálculo de cada uno de los disipadores analizados según el disipador que se haya seleccionado al inicio. Las memorias están programadas en RMarkdown con extensión de archivo (.Rmd) y tienen un formato de salida (.pdf) lo cual es conveniente para los usuarios ya que disponen de un documento donde se encuentra toda la información acerca del dimensionamiento de los disipadores.

Los pares ordenados que se generan al compilar las líneas de código se guardan en un archivo en formato (.xlsx). Cada columna de este archivo puede ser copiada en Autocad como polilínea lo que generará un esquema básico que permita tener una idea del dimensionamiento del disipador.

Tanto los reportes PDF como las hojas de cálculo XLSX se guardan dentro de la carpeta de la aplicación. Cabe mencionar que para ejecutar un nuevo caso de un disipador determinado se debe cerrar todos los archivos generados previamente, ya que la información se reescribe en los mismos archivos.

Anexo III. Diagramas de flujo

Exportación de pares ordenados de los disipadores a hojas de cálculo en formato (xlsx)



Anexo IV. Ecuaciones para el cálculo de los disipadores

▪ Número de Froude

El número de Froude representa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales, “el número de Froude tiene importancia en flujos con grandes velocidades que ocurren por acción exclusiva de la gravedad” (Sotelo Ávila, 1997, p. 189).

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}}$$

Ecuación 5.1. Número de Froude

Donde:

F_r : Número de Froude.

V : Velocidad media. (m/s)

g : Aceleración de la gravedad. (m/s²)

d : Profundidad hidráulica. (m)

Nota: En un canal rectangular la profundidad hidráulica es igual al calado del flujo (y), mientras que para una tubería parcialmente llena es igual a (A/T).

▪ Límite inferior para flujo rasante

El límite inferior para flujo rasante (*FRAS*) sobre un canal de fondo escalonado se ha tomado mediante las ecuaciones de Ohtsu & Yasuda y Chanson. También se muestra el límite superior para flujo en transición y una curva representativa que está muy cercana al promedio de todas al anteriores y que es con la que se chequeó el tipo de flujo (Del Toro Ávila, 2013).

- El límite inferior para FRAS según Ohtsu & Yasuda (Del Toro Ávila, 2013, p. 47), cuando: $0.1 \leq \frac{h}{l} \leq 1.43$.

$$\frac{y_c}{h} = 0.862 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.165}$$

- Según Chanson (2002), para valores de: $\frac{h}{l} = 0.5 \dots \dots 1.7$

$$\frac{y_c}{h} = 1.2 - 0.325 \cdot \frac{h}{l}$$

- Límite superior para flujo en transición, para valores de (h/l): $0 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7$

$$\frac{y_c}{h} > \frac{0.9821}{\left(\frac{h}{l} + 0.388\right)^{0.384}}$$

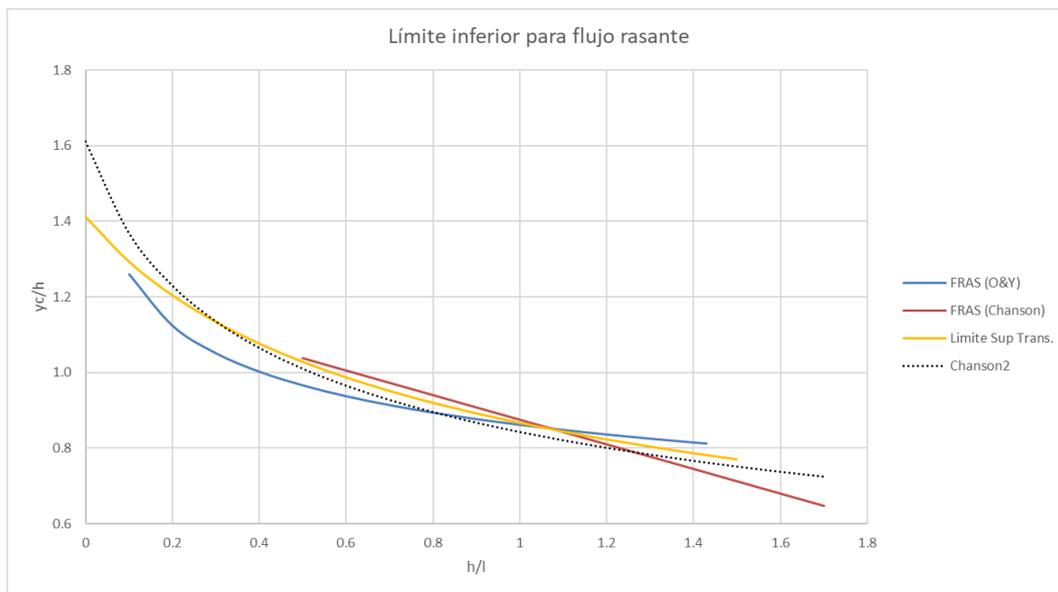


Figura 5.1. Límites del flujo FRAS (varios autores)
Elaborado por: Daniel Campaña E.

- **Límite superior para flujo saltante**

El límite superior para flujo FEXE tendrá los siguientes límites. De estas curvas el límite inferior de transición visualmente se puede considerar un promedio entre estas curvas.

- El límite superior para FEXE según Ohtsu & Yasuda (Del Toro Ávila, 2013, p. 47) cuando: $0.1 \leq \frac{h}{l} \leq 1.43$

$$\frac{y_c}{h} = \frac{\left(1.43 - \frac{h}{l}\right)^{0.26}}{1.4}$$

- Según Chanson (2002), para valores de: $\frac{h}{l} = 0.5 \dots \dots 1.7$

$$\frac{y_c}{h} = 0.89 - 0.4 \cdot \frac{h}{l}$$

- Límite inferior para flujo en transición, para valores de (h/l) : $0 \leq \frac{h}{l} \leq 1.7$

$$\frac{y_c}{h} > 0.9174 - 0.381 \cdot \frac{h}{l}$$

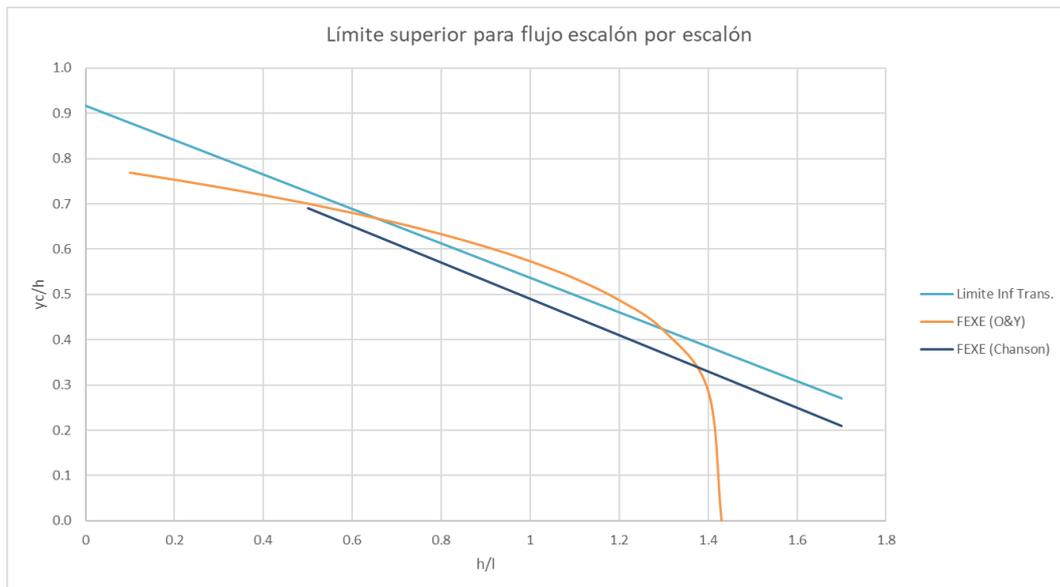


Figura 5.2. Límites del flujo FEXE (varios autores)
Elaborado por: Daniel Campaña E.

▪ **Comparación de los límites para flujo en una rápida de fondo escalonado**

Para el dimensionamiento se tomó la curva más representativa y que más se acercó al promedio para definir el tipo de flujo sobre una rápida de fondo escalonado.

Al calcular las relaciones (h/l) de los escalones y (y_c/h) se puede graficar un punto sobre dicha grafica lo que permite comprobar el tipo de flujo que se tendrá sobre la rápida. Así, por ejemplo, el punto mostrado en la figura denota que el existe un flujo rasante sobre la rápida.

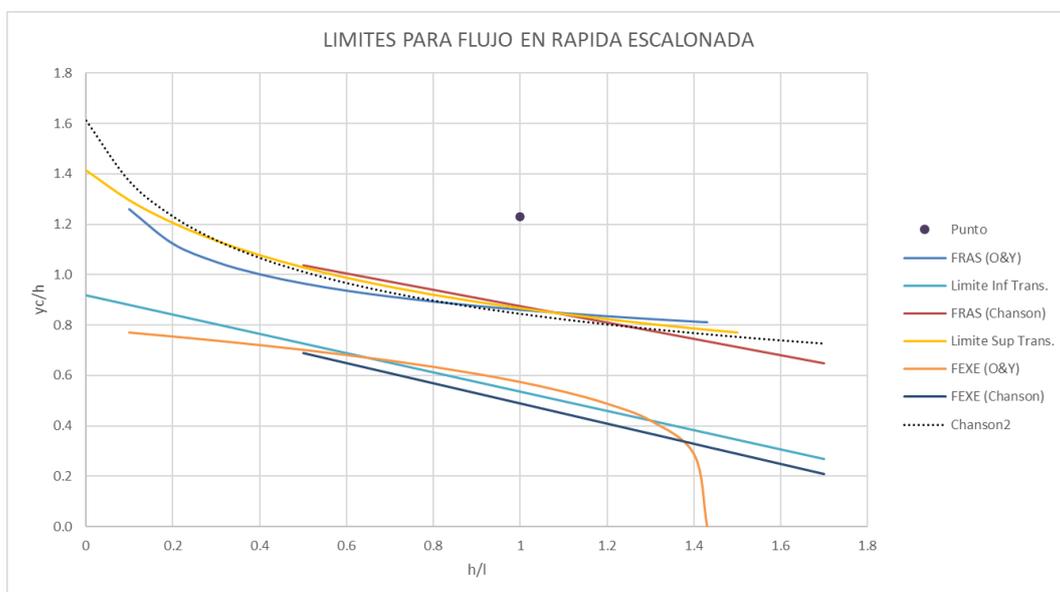


Figura 5.3. Límites del flujo en una rápida con fondo escalonado
Elaborado por: Daniel Campaña E.

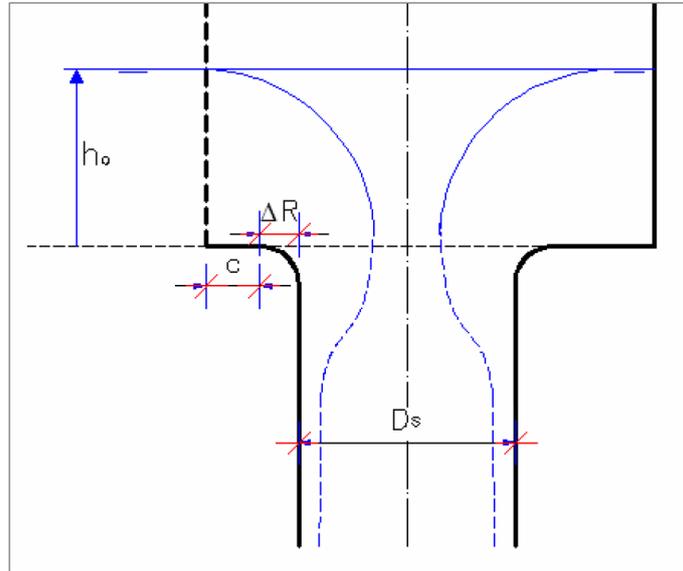


Figura 5.4. Dimensiones de la cámara de entrada tipo caracol
Fuente: (Haro y Jara, 2006)

La dimensión c corresponde a " c_{sb} " para indicar que dicha dimensión constructiva corresponde al descargador a vórtice para flujo subcrítico. La distancia s corresponde al diámetro de esquina que interseca el canal de aproximación con la cámara de entrada, como se puede ver en la Figura 5.5.

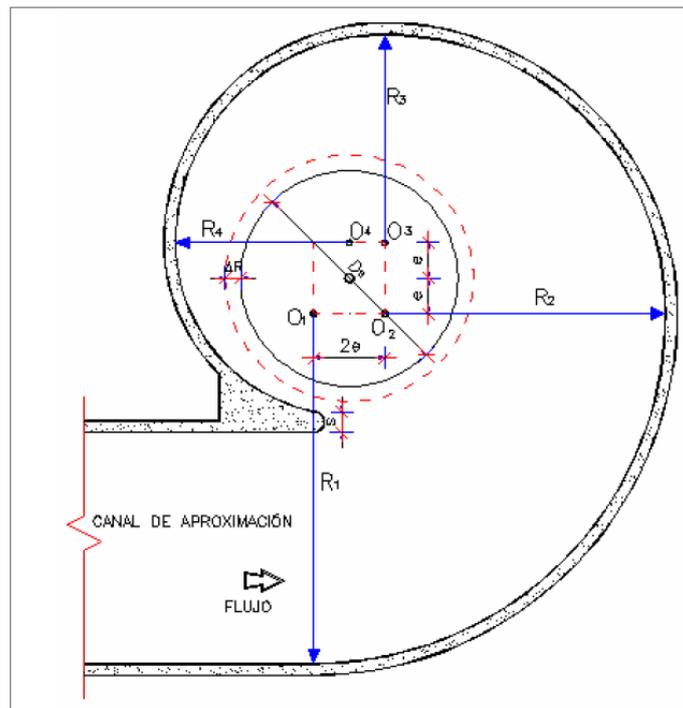


Figura 5.5. Dimensiones en planta de la cámara de entrada
Fuente: (Haro y Jara, 2006)

Cuando el caudal de diseño supera el los (2500 lt/s) el dimensionamiento de pozo de bandejas se debe realizar según el ábaco de la Figura 5.6.

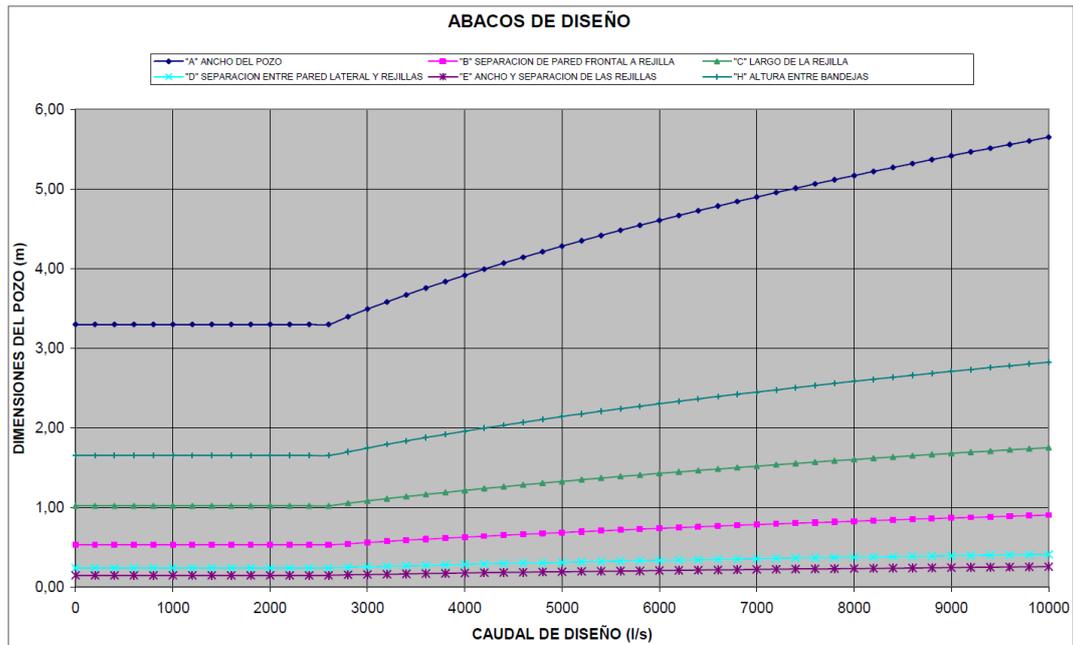


Figura 5.6. Ábaco de diseño para pozo de bandejas
Fuente: (Haro y Jara, 2006, p. 105)

Anexo V. Herramientas básicas de RMarkdown

▪ Descripción del software utilizado

R es un software libre y un lenguaje de programación que apareció por el año de 1993. Su principal uso es en el campo de la estadística. Sin embargo, debido al amplio desarrollo de extensiones o librerías (packages) este software se utiliza en investigaciones, análisis de datos, generación de documentos científicos, entre otros.

RStudio es un entorno de programación que utiliza a R como lenguaje base, además cuenta con una interfaz amigable con el usuario cuyo entorno está dividido en secciones donde se diferencian la sección de inserción de código R, la sección de edición de scripts, la sección de variables y la sección de paquetes instalados. Estas secciones a su vez tienen otras pestañas que despliegan otro tipo de información.

Markdown es un lenguaje de marcado ligero el cual emplea texto plano para la elaboración de documentos con fórmulas, caracteres especiales, imágenes, entre otras. Se puede aplicar este lenguaje mediante una librería de RStudio.

RMarkdown es una librería (package) que permite utilizar el lenguaje de marcado ligero con la que se pueden elaborar documentos y reportes con una mayor facilidad ya que utiliza texto plano el cual será posteriormente convertido en el reporte final.

▪ Creación de un reporte en RMarkdown

El primer paso es instalar R y RStudio posteriormente se procede a descargar e instalar la librería RMarkdown con la cual se pueden realizar reportes con algunos formatos de salida como son: (.docx), (.html), (.pdf), estos formatos de salida se definen al inicio, aunque pueden ser modificadas si se lo requiere.

Para comenzar se recomienda crear un proyecto nuevo con el fin de que todos los documentos creados se guarden en un solo directorio, para crear el nuevo proyecto se debe hacer clic en **File** de la barra de menú y luego en **New Project** y definir la ubicación y el nombre del nuevo directorio donde se desea guardar los archivos.

A continuación, se debe crear un documento nuevo se debe hacer clic en **File** de la barra de menú y luego en **New File** y escoger **R Markdown**, en la ventana que aparecerá mostrada en la Figura 5.7 se debe ingresar el nombre el autor, la fecha y el formato de salida del archivo. Estos datos pueden ser modificados después, sin embargo, se recomienda poner nombres detallados que permitan reconocer fácilmente el proyecto al que pertenece.

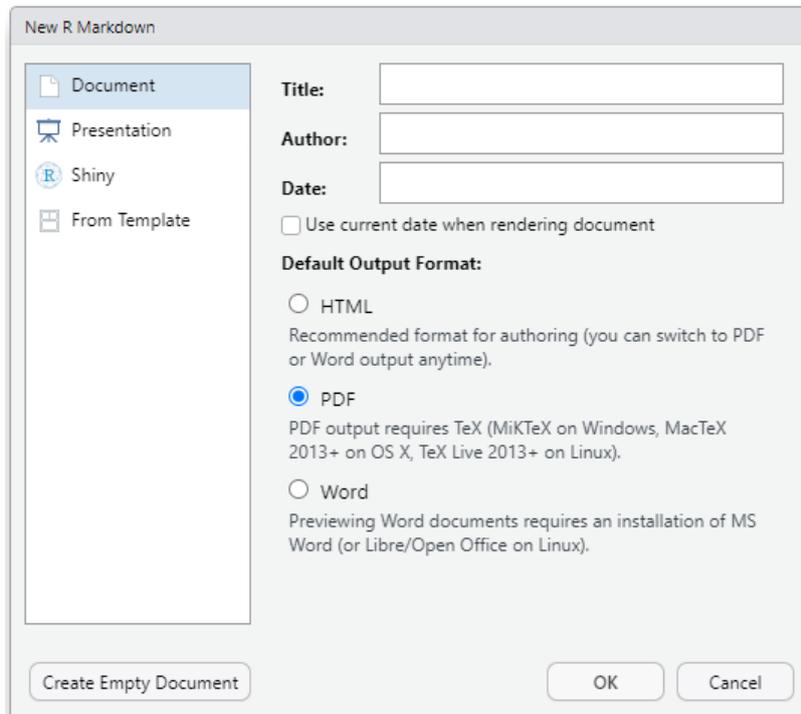


Figura 5.7. Nuevo documento RMarkdown

Fuente: RStudio 2023.06.2

- **Encabezado YAML**

Una vez creado el archivo, por defecto se crea un encabezado conocido como YAML el cual contiene la información técnica básica del archivo la cual se ingresó anteriormente. En la Figura 5.8 se puede observar la forma de este encabezado y se lo puede reconocer porque se encuentra entre tres diagonales (---). Esta información es importante ya que aparecerá en el documento de salida. Es importa mencionar que esta información se debe colocar entre comillas para evitar conflictos con el software.

```
1 ---  
2 title: "Titulo"  
3 author: "Autor"  
4 date: "Fecha"  
5 output: pdf_document  
6 ---
```

Figura 5.8. Encabezado YAML

Fuente: RStudio 2023.06.2

La información en este encabezado se puede editar y además de las opciones por defecto se puede cambiar otro tipo de opciones que complementan el formato del documento. Los datos de este encabezado permiten personalizar los parámetros del reporte según los requerimientos de salida del mismo. Se profundizó en la revisión de la mayoría de estos parámetros con el fin de presentar al usuario las diferentes secciones de personalización del

documento. Para este trabajo de investigación se han considerado las opciones más necesarias las cuales se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros editables del encabezado YAML

PARÁMETROS DEL ENCABEZADO YAML				
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Opciones	Descripción
title:				Título del documento, se coloca entre comillas dobles
subtitle:				Subtítulo del documento (opcional) va entre comillas
autor:				Autor de trabajo, entre comillas dobles
date:				Fecha entre comillas, también se puede colocar con código
lang:			es-Es / otros	Define el idioma de los caracteres automáticos
output:				
	pdf_document:			Formato del documento de salida
		latex_engine:	xelatex	Motor de conversión
		number_sections:	TRUE / FALSE	Colocar las secciones con número en frente
		toc:	TRUE / FALSE	Colocar índice
		toc_depth:	1 / 2 / 3 / ... / 6	Niveles de títulos y subtítulos a mostrar en el índice
papersize:			a4 / letter / otros	Tamaño de las hojas del archivo de salida
linestretch:			1.5 / otros	Interlineado del texto
fontsize:			11pt / otros	Tamaño de letra del documento
mainfont:			Arial	Tipo de letra del documento de salida
bibliography:			Bibliografía.bib	Archivo que contine toda la bibliografía referenciada con extensión (.bib)
csf:			Apa.csf	Archivo del formato de la bibliografía con extensión (.csf)

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Nota: Para pasar del nivel 1 al 2 en el documento basta con presionar la tecla de tabulación.

Los parámetros en el encabezado YAML desde el título hasta la fecha se debe poner entre comillas. En la sección de fecha se puede ingresar una línea de código de forma que cada vez que se ejecute la aplicación se guarde la fecha actual sin necesidad de cambiarla en cada ocasión. Además de las comillas esta línea de código debe ir entre el símbolo de tilde invertida

(`)` y a continuación dar el formato de la fecha que se desea. Por ejemplo, si se desea colocar día, mes y año se tendría: ``r format(Sys.time(), '%d/%m/%Y')``

- **Chunk**

Una de las ventajas de generar reportes con RMarkdown es que se puede agregar líneas de código dentro del texto sin que necesariamente estas sean visibles en el reporte final. Un chunk es trozo o fragmento de código en el que se puede ingresar código de R y mostrar solo el resultado. Se puede crear esta sección ingresando los caracteres que se muestran en la Figura 5.9, mediante este ícono  o la forma corta es presionando **Ctrl+Alt+i**.



Figura 5.9. Espacio para código R (Chunk)

Fuente: RStudio 2023.06.2

Los chunks se pueden ejecutar independientemente si sus líneas de programación no dependen de una o más variables que se encuentren en un chunk anterior. Estos fragmentos de código tienen las opciones de ejecutar el chunk o no hacerlo, mostrar las respuestas o no hacerlo y mostrar las líneas de código en el reporte final u ocultarlas. En la Tabla 5.2 se describen estas opciones.

Tabla 5.2. Opciones de ejecución de los fragmentos de código

PARÁMETRO	OPCIONES	DESCRIPCIÓN
echo	TRUE	Muestra las líneas del chunk en el reporte final
	FALSE	Oculto las líneas de chunk en el reporte final
include	TRUE	Muestra los resultados de los comandos print, plot o similares en reporte final
	FALSE	Oculto los resultados de print, plot o similares en el reporte final
eval	TRUE	Evalúa el chunk
	FALSE	Omite la evaluación del chunk

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Nota: Si se coloca como opción `eval=FALSE` los chunks que dependan de los resultados de este fragmento no podrán realizar sus cálculos y el programa emitirá un error. Sin embargo, es muy útil en la parte inicial de la programación donde se requiere probar la aplicación con distintos grupos de datos.

- **Transformación de archivos Rmd**

Los archivos RMarkdown tienen extensión (.Rmd) donde se puede realizar un informe en un solo documento. Para la compilación de todos los resultados que incluye texto, gráficas, tablas, fórmulas, entre otros se necesita de dos herramientas las cuales son: el paquete de R **knitr** y el programa **pandoc**. La secuencia de conversión del archivo se puede observar en la Figura 5.10.

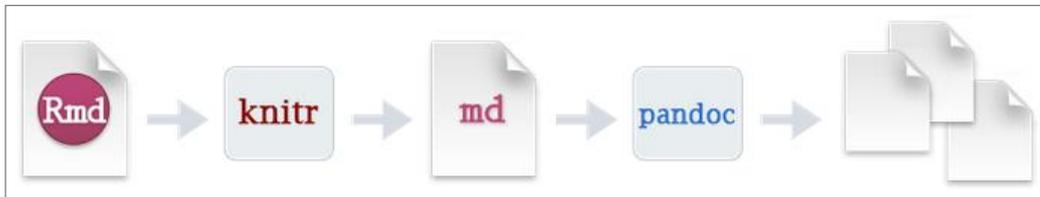


Figura 5.10. Conversión de archivos Rmd a Pdf

Fuente: (Coll y Pérez, 2017)

El paquete knitr se encarga de ejecutar las líneas de código de tablas, gráficas y líneas de texto y transfiere todo a un documento (.md) y el programa pandoc transforma este archivo al formato del documento elegido en el encabezado YAML, los cuales pueden ser (.pdf, html o .docx).

Nota: En el manual de usuario que se encuentra en el Anexo II se explica con mayor detalle como instalar la librería knitr y el pandoc.

Anexo VI. Misceláneos de R, RStudio y RMarkdown

- **Funciones abreviadas**

Tabla 5.3. Atajos de funciones en RMarkdown

FUNCIÓN	ATAJO
Ejecutar código seleccionado de un script	Ctrl + Enter
Ejecutar todo el código de un script	Ctrl + A luego Ctrl + Enter
Ejecutar el código en RMarkdown	Ctrl + Shift + K
Borrar la consola en RStudio	Ctrl + L
Retornar a un lugar anterior	Ctrl + F9
Avanzar a un lugar posterior	Ctrl + F10
Insertar un nuevo chunk	Ctrl + Alt + I

Elaborado por: Daniel Campaña E.

- **Comandos útiles**

Tabla 5.4. Comandos útiles en RMarkdown

FUNCIÓN	COMANDO
Eliminar todos los objetos del entorno de variables	<code>rm(list = ls())</code>
Colocar la fecha actual en formato (dd/mm/aaaa)	<code>format(Sys.time(), '%d/%m/%Y')</code>
Insertar un salto de página en RMarkdown	<code>\pagebreak</code>
Colocar el texto que sigue en la siguiente página	<code>\clearpage</code>
Insertar un salto de línea	<code>\linebreak</code>
Insertar un comentario en RMarkdown	<code><!-- comentario --></code>
Insertar una variable con 2 decimales	<code>sprintf("%.2f", variable)</code>
Regresar a una línea anterior en RMarkdown	<code>\hfil</code>
Insertar un comentario en un chunk	<code># comentario</code>
Insertar imagen en RMarkdown. Ej:	<code>¡[Imagen ...](img.png){width=50px}</code>
Citación con número de página	<code>[@autor, p. ##]</code>
Iniciar cronómetro	<code>variable <- proc.time()</code>
Finalizar cronómetro	<code>Proc.time() - variable</code>

Elaborado por: Daniel Campaña E.

Nota: Las “variables” las define el usuario según su programación.