



**UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CUENCA**
COMUNIDAD EDUCATIVA AL SERVICIO DEL PUEBLO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

SEDE AZOGUES

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN

INFORME FINAL DEL PROYECTO PROFESIONAL DE GRADO
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO DE
INGENIERO CIVIL

TEMA:

**ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA RIEGO: CONDUCCIÓN,
MEDICIÓN, DISTRIBUCIÓN Y MANTENIMIENTO**

AUTOR: MANUEL MESÍAS LEMA GUALLPA

TUTOR: ING. RÓMULO RICARDO ROMERO GONZÁLEZ

FEBRERO- 2018

APROBACIÓN DEL TUTOR

En la calidad de tutor del trabajo de grado, presentado por el Sr. Manuel Mesías Lema Guallpa para optar por el título de INGENIERO CIVIL, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Azogues, a los 05 días del mes de febrero de 2018.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R. R. G.', is positioned above a horizontal dashed line.

Ing. Rómulo Ricardo Romero González

DOCENTE DE LA UNIDAD ACADÉMICA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CI: 0301757084

CERTIFICADO DE AUTORIA

El presente trabajo investigativo de proyecto profesional de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, cuyo tema es “ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS PARA RIEGO: CONDUCCIÓN, MEDICIÓN, DISTRIBUCIÓN Y MANTENIMIENTO”, corresponden al trabajo de investigación del autor, además certifico que he cumplido con todas las observaciones realizadas por el tribunal evaluador.



Manuel Mesías Lema Gualpa

ESTUDIANTE

CI: 0302501358

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, a Dios por haberme guiado mi camino y darme las fuerzas para perseverar; en segundo lugar, a cada uno de los que son parte de mi familia a mi PADRE Mesías Lema, mi MADRE María Juana Gualpa, a mis hermanos; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

Deseo expresar mi sincera gratitud al Ing. Wilson Remigio Clavijo Pinos, Coordinador del Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Cañar, por haberme propuesto el tema para la elaboración de mi tesis de grado y también por haber compartido sus conocimientos siendo mi asesor institucional externo.

También quiero agradecer al Ing. Carlos Alberto Vásquez Vera, director del Departamento de Riego y Drenaje del Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Cañar; por haberme dado la oportunidad de realizar mis practicas pre-profesionales.

A los técnicos del Departamento de Riego y Drenaje: Ing. Ángel Morocho, Ing. Galo García, Ing. Fabián Ganzhi, Ing. Patricio Ortiz Bermeo, Ing. Luis Zaruma, Ing. José Fajardo Zaruma, Ing. Iván Coronel Vicuña, Ing. Miriam Vargas Castillo, Ing. Carmita Rodríguez, Ing. Marcelo Ávila y al Ing. Oswaldo Quinde; por haberme compartido sus conocimientos, experiencias y enseñanzas en el área de hidráulica.

A la Universidad Católica de Cuenca sede Azogues, por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

De igual manera agradecer a mi director de tesis de grado Ing. Rómulo Ricardo Romero González; quien con sus conocimientos y vasta experiencia en el campo de la docencia universitaria, me guio en la revisión y corrección de mi tesis de grado.

DEDICATORIA

DIOS, DIVINO NIÑO JESUS Y LA SANTISIMA VIRGEN DEL ROCIO: Por ser la fuerza espiritual que me brindo perseverancia y tenacidad para alcanzar el éxito.

MIS PADRES: Mesías Lema y María Juana Gualpa; por su esfuerzo, dedicación y sacrificio hoy muestro mi eterna gratitud al hacer realidad mi sueño.

HERMANOS: José, Roció y Rosa; por su apoyo incondicional en todo momento, sus sabios consejos que supieron enrumbar mi camino.

MIS AMIGOS EN GENERAL: Por el apoyo que desinteresadamente me brindaron en el contexto educativo con sus conocimientos y por compartir momentos inolvidables de sano esparcimiento. Durante los años que transcurrieron en mi vida universitaria he conocido a grandes personas que se ganaron mi amistad y mi gratitud.

PARA MI ENAMORADA: Mirian Patricia Calle Rubio, la mujer más hermosa de este mundo, gracias por cruzarte en mi camino y llenar todos mis días de alegría, paz, amor y locuras.

RESUMEN

La presente tesis realiza el análisis y el diseño teórico de las estructuras hidráulicas que son utilizadas para la conducción, medición y distribución del agua hacia las parcelas de un sistema de riego.

En el primer capítulo se describe los aspectos más relevantes del proyecto como: La formulación del problema, delimitación del problema, los objetivos que se pretenden alcanzar, la justificación y la metodología que será empleada para lograr dichos propósitos. El segundo capítulo refiere al marco teórico de las estructuras hidráulicas que son utilizadas para la conducción del agua; se detallan los principios y conceptos básicos que se debe de conocer para realizar análisis y diseños correctos. Además se describen los procedimientos para realizar el diseño hidráulico paso a paso de dichas infraestructuras.

En el tercer capítulo se detallan los mismos lineamientos descritos anteriormente pero ahora enfocado a las estructuras de distribución. En el cuarto capítulo se dan algunas pautas para realizar el mantenimiento periódico de estas obras hidráulicas. Finalmente se darán a conocer los predimensionamientos obtenidos con los datos proporcionados por el GADPC; de las siguientes infraestructuras hidráulicas: Canales, tuberías, rápidas, tanques repartidores de caudal y vertederos.

Palabras clave:

Análisis, Criterios, Diseño Hidráulico, Procedimiento, Mantenimiento

ABSTRACT

This thesis carries out the analysis and the theoretical design of the hydraulic structures that are used for the conduction, measurement and distribution of water towards the plots of an irrigation system.

In the first chapter, the most relevant aspects of the project are described as followed: the formulation of the problem, delimitation of the problem, objectives that are intended to be achieved, justification, and methodology to do the research. The second chapter refers to the theoretical framework of hydraulic structures for water conduction; the basic principles and concepts that must be known to perform correct analyzes and designs are detailed. In addition, step-by-step, it is described the procedures to construct the hydraulic design of these infrastructures.

In the third chapter, it is detailed, the same guidelines described above but they are focused on the distribution structures. In the fourth chapter, some procedures are given to perform the periodic maintenance of these hydraulic works. Finally, it is explained the predetermined dimensions obtained with the data provided by the GADPC from the following hydraulic infrastructures: Channels, pipes, rapids, flow distribution tanks and landfills.

Keywords: Analysis, Criteria, Hydraulic Design, Procedure, Maintenance

INDICE

APROBACIÓN DEL TUTOR	II
CERTIFICADO DE AUTORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
INTRODUCCIÓN	IX
CAPITULO I	1
DESCRIPCION GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 GENERAL	3
1.3.2 ESPECIFICOS	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.5 METODOLOGÍA	5
CAPITULO II	7
ESTRUCTURAS DE CONDUCCIÓN.....	7
2.1 GENERALIDADES.....	7
2.2 CANALES	7
2.2.1 NOCIONES FUNDAMENTALES EN EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CANALES.....	8
2.2.2 SECCIONES MÁS FRECUENTES EN CANALES.....	9

2.2.3	FLUJO EN CANALES	11
2.2.4	ELEMENTOS CONTITUTIVOS.....	14
2.2.5	DISEÑO HIDRÁULICO DE CANALES	18
2.3	TUBERIAS	27
2.3.1	LINEA DE CONDUCCIÓN	28
2.3.2	CRITERIOS DE DISEÑO	30
2.3.3	ELEMENTOS DE UNA OBRA DE CONDUCCIÓN	31
2.3.4	DISEÑO HIDRÁULICO DE TUBERÍAS.....	37
2.4	RAPIDAS	53
2.4.1	ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA RAPIDA.....	53
2.4.2	DISEÑO HIDRAULICO.....	58
CAPITULO III		69
ESTRUCTURAS DE DISTRIBUCION Y MEDICION DE CAUDALES		69
3.1	GENERALIDADES.....	69
3.2	REPARTIDORES DE CAUDAL	70
3.2.1	ESTRUCTURAS DE APROXIMACION.....	71
3.2.2	DISEÑO HIDRAULICO DE UN TANQUE REPARTIDOR DE CAUDAL.....	75
3.3	MEDIDORES DE CAUDAL.....	82
3.3.1	DISEÑO HIDRAULICO.....	82
CAPITULO IV.....		85
MANTENIMIENTO PARA LAS ESTRUCTURAS DE CONDUCCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y MEDICIÓN.....		85
4.1	GENERALIDADES.....	85

4.2	PROCESOS DE MANTENIMIENTO PARA LAS ESTRUCTURAS DE CONDUCCIÓN	86
4.2.1	CANALES.....	86
4.2.2	TUBERIAS	87
4.2.3	RAPIDAS.....	89
4.3	PROCESOS DE MANTENIMIENTO PARA LAS ESTRUCTURAS DE DISTRIBUCION Y MEDICIÓN DE CAUDALES.....	90
4.3.1	REPARTIDORES DE CAUDAL.....	90
4.3.2	MEDIDORES DE CAUDAL	90
	CONCLUSIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA	93
	ANEXOS	95
	DIMENSIONES DE CANALES Y TUBERIAS A FLUJO LIBRE	96
	DIMENSIONES DE RAPIDAS DE GRAN PENDIENTE	102
	DIMENSIONES DE TANQUES REPARTIDORES DE CAUDAL.....	103
	VERTEDEROS DE PARED DELGADA.....	104

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Taludes recomendados en función del material. Talud Z:1 (H:V) ...	11
Tabla 2	Relaciones geométricas de las secciones transversales más comunes en canales.....	16
Tabla 3	Tuberías Flex	33
Tabla 4	Coeficientes de pérdida de distintos accesorios	39
Tabla 5	Coeficientes de Chow para la fórmula de Hazen – Williams.....	44
Tabla 6	Coeficientes propuestos por Nichiporovichl	57
Tabla 7	Criterios de diseño de vertederos.	74

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Canal de sección tipo rectangular.	9
Figura 2. Canal de sección tipo trapezoidal.....	10
Figura 3. Canal de sección tipo triangular	10
Figura 4. Canal de sección tipo circular	11
Figura 5. Elementos de la sección de un canal	15
Figura 6. Cargas estáticas y dinámicas de la línea de conducción. Fuente: Guía de diseños para líneas de conducción e impulsión de sistema de abastamientos de agua rural.....	30
Figura 7. Tanque rompe presión. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastamientos de agua rural.....	31
Figura 8. Tubería de polietileno. Fuente: PLASTIGAMA.....	32
Figura 9. Tubería PVC. Fuente PLASTIGAMA.....	34
Figura 10. Válvula de limpieza y de aire. Fuente GADPC.....	35
Figura 11. Válvula reguladora de presión. Fuente GADPC.....	36
Figura 13. Uniones para tuberías PVC. Fuente PLASTIGAMA.....	36
Figura 14. Presión negativa. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastamientos de agua rural.....	40
Figura 15. Presión residual positiva. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastamientos de agua rural.....	40
Figura 16. Ubicación de estructuras complementarias. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastamientos de agua rural.....	41
Figura 17. Análisis de la línea de conducción por cada tramo	48
Figura 18. Tabla ilustrativa con los cálculos de las presiones y diámetros ..	51
Figura 19. Perfil de la línea de conducción	52
Figura 20. Elementos constitutivos de una rápida.....	53
Figura 21. Transición de entrada.....	54

Figura 22. Curva vertical de enlace en las rápidas.....	56
Figura 23. Geometría de una rápida de gran pendiente.....	64
Figura 24. Método de los tramos fijos-plantilla	66
Figura 25. Plantilla para el cálculo de la altura del canal de la rápida	67
Figura 26. Dimensiones de una rápida.....	68
Figura 27. Descarga sobre un vertedero rectangular en pared delgada. Fuente: Rocha Felices Arturo.....	72
Figura 28. Dimensiones del Tanque repartidor de caudales.	78
Figura 29. Tipos de vertederos por su forma.....	82
Figura 30. Mantenimiento de canales. Fuente: GADPC.....	86
Figura 31. Limpieza del tanque rompe presión. Fuente: GADPC.....	87
Figura 32. Reparación de una tubería plástica de PVC. Fuente: GADPC....	88

INTRODUCCIÓN

La provincia del Cañar se ha catalogado dentro de nuestro País como una zona con gran potencial agrícola y ganadero. El Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Cañar ha venido trabajando conjuntamente con las comunidades de toda la provincia en proyectos de riego y drenaje.

Por su ubicación geográfica y por su gran cantidad de afluentes que pueden ser aprovechados para el riego, no se hace tan fácil generalizar los diseños hidráulicos para la medición, conducción y distribución de este líquido vital, pues se necesita un tiempo considerable para realizar los respectivos análisis y diseños. Por esta razón, el presente trabajo pretende ser un material de guía y de apoyo muy valioso para los técnicos que pretendan rehabilitar o diseñar nuevos sistemas de riego, pues lo que se aspira con este material es establecer un catálogo generalizado, con las respectivas dimensiones geométricas correspondientes a canales, tuberías, vertederos y repartidores de caudales.

A más de eso se implementará un capítulo muy especial dedicado al mantenimiento de las obras destinadas a la conducción y distribución. El cual tiene como finalidad servir de guía técnica y practica para que los usuarios de un sistema de riego realicen el mantenimiento periódico de dichas infraestructuras, para que de esta manera se pueda aprovechar más eficiente el líquido vital para el riego parcelario

CAPITULO I

DESCRIPCION GENERAL DEL PROYECTO

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la irregularidad topográfica que posee nuestra provincia, no se vuelve tan fácil el diseño de una red de conducción, pues las características técnicas de cada tipo de conducción (desventajas, ventajas, costos y durabilidad), son elementos importantes para decidir cuál es la más apropiada para las condiciones específicas de un proyecto. También hay que considerar las características del terreno como pendiente, accesibilidad y naturaleza del suelo para una elección adecuada. Esto implicaría para un diseñador realizar múltiples iteraciones matemáticas para determinar qué tipo de conducción se ajustaría de mejor manera a las características del lugar en donde se procura construir una estructura hidráulica específica. Lo cual genera una pérdida de tiempo y ralentiza la construcción o rehabilitación de la infraestructura.

De forma similar tendría que hacerse un análisis con los elementos que son utilizados para la distribución y la medición del agua para riego.

Por lo expuesto es necesario agilizar procesos de selección del tipo de conducción y distribución que se han de utilizar, los cuales se acomodaran a la realidad territorial de nuestra provincia.

Un problema muy frecuente que se presenta en las infraestructuras de riego son el deterioro por el paso del tiempo, o la falta de mantenimiento que a su vez genera problemas de funcionalidad dentro del sistema.

Por lo cual es necesario proporcionar lineamientos claros orientados a motivar y guiar a los usuarios para que estos se involucren de manera más activa y frecuente en el cuidado preventivo que se les debe dar a estas obras hidráulicas para un correcto aprovechamiento del agua en sus parcelas.

1.2 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El diseño de un sistema de riego consiste en el desarrollo de las obras hidráulicas de forma simultánea, el proceso se inicia con un bosquejo conceptual, que describe las principales tipologías del sistema y su funcionamiento.

El punto de inicio que se toma para realizar el diseño conceptual es recopilación de la información básica sobre la fuente de agua, los beneficiarios del sistema, el uso que se le quiere dar al agua en la producción agrícola y las tipologías generales del terreno. Cuando se cuentan con estos datos preliminares se procede al diseño detallado de todas las obras de riego. Para ello, se plantean las obras preliminares en campo y se verifica las posibilidades de su construcción.

Es en esta etapa en donde se generan los errores más habituales en el dimensionamiento y diseño de las obras hidráulicas.

En el dimensionamiento hidráulico podría afectar directamente en el costo definitivo de la obra o a su vez generar problemas con el suministro del agua.

En el diseño hidráulico puede ocasionar complicaciones de funcionalidad, durabilidad, eficiencia y sostenibilidad. Además la durabilidad y funcionalidad dependerá del correcto mantenimiento que se dé a las infraestructuras hidráulicas, pues al realizar un cuidado periódico se previene problemas futuros dentro del sistema.

El análisis y diseño de las diferentes obras destinadas para la medición, conducción y distribución se los realizará tomando en cuenta diversos factores como: Caudales, pendientes, presiones, velocidades máximas y mínimas permisibles de acuerdo a las normas: Diseño para Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable, Disposición de Excretas y Residuos Líquidos en el Área Rural emitida por la Secretaria Nacional del Agua (SENAGUA),

Manual Práctico para el Diseño de Sistemas de Minirriego de la FAO y el Plan Nacional de Drenaje y Riego del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca del Ecuador (MAGAP).

Los resultados que se obtengan se ajustaran exclusivamente a la realidad territorial de nuestra provincia, es decir que para cada caso existirá un dimensionamiento específico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

- Elaborar un manual para el correcto dimensionamiento de las obras de infraestructura hidráulica utilizadas para la conducción, medición y distribución del agua para riego en base a estadísticas levantadas por el Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial del Cañar.

1.3.2 ESPECIFICOS

- Homologar criterios de análisis y diseños para las obras civiles utilizadas para conducción, medición y distribución del agua para riego.
- Establecer rangos específicos de trabajo para los diseños hidráulicos mediante la tabulación de datos estadísticos proporcionados por la institución.
- Diseñar hojas electrónicas de cálculo para agilizar procesos de dimensionamientos geométricos de la infraestructura.
- Realizar un manual de mantenimiento de para el control adecuado de suministro de agua a través de canales, tuberías, repartidores de caudales y vertederos.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El Gobierno Provincial del Cañar, con el afán de alentar las actividades productivas de los sectores agrícolas de la jurisdicción, efectúa el mejoramiento y construcción de infraestructura de riego en toda la provincia, pues considera que el agua de riego tiene un papel fundamental en la agricultura y constituye un factor importante para mejorar la seguridad alimentaria de la población.

Actualmente la conducción de agua para el riego se lo viene realizando utilizando tuberías y canales abiertos. La distribución se lo hace a través de repartidores y la medición del caudal que viene por un canal se lo realiza utilizando vertederos, según la información proporcionada por el Departamento de Riego y Drenaje del Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia del Cañar.

Por la importancia que representan estas obras hidráulicas para los agricultores y ganaderos de esta parte de la zona austral de nuestro país el Ecuador, se ve la necesidad de implementar una herramienta que acoja criterios técnicos de análisis y diseño, que permita ser un material de consulta práctica y sencilla para la rehabilitación o la realización de nuevos sistemas de conducción y distribución de agua para el riego agrícola, minimizando así los tiempos en el dimensionamiento geométrico. Además se implementaran lineamientos claros y precisos que serán de mucha ayuda para los usuarios de un sistema de riego a la hora de realizar un mantenimiento adecuado del mismo.

En lo concerniente a lo técnico; el diseño de una red de conducción o distribución está sujeto a varios juicios descritos por distintos autores, los cuales trataremos de unificar en este material, para una mejor comprensión del lector.

La elaboración de este material es factible desde el punto de vista técnico, pues las magnitudes de las variables a considerar no son fijas, por lo cual para cada caso se procura dar una solución específica.

1.5 METODOLOGÍA

Para un correcto funcionamiento de un sistema de riego, las obras hidráulicas que lo conforman deben de estar adaptadas a las condiciones de su uso y entorno. En las zonas irregulares que presenta nuestra región andina conlleva a que las obras que se vayan a diseñar y construir deben obligatoriamente acomodarse a las condiciones climáticas variantes, a los cambios de los caudales en periodos de invierno o verano y sobre todo a la topografía.

Para que el lector tenga una mejor visión y comprensión sobre la metodología que se emplea en el análisis y diseño de las diferentes infraestructuras hidráulicas utilizadas en un sistema de riego, se realizara un bosquejo bibliográfico amplio que permita encontrar diversos juicios conceptuales propuestos por diversos autores. Entre los cuales podemos hallar algunas definiciones, ventajas, desventajas, formulaciones y procedimientos que se utilizan generalmente en el diseño de las infraestructuras hidráulicas.

Y luego de realizar un análisis minucioso de los mismos, se los unificara para establecer lineamientos claros y precisos que sean fáciles de entender y comprender.

Al contar con varios datos numéricos como los caudales y pendientes se hace imprescindible ordenarlos para su utilización, pues en base a esto se establecerán rangos de trabajo cómodos de manejar.

Para agilizar procesos de diseño se emplearan hojas de cálculo de Microsoft Excel previamente programadas, pues la formulación utilizada para

el dimensionamiento geométrico de canales, tuberías, vertederos y repartidores de caudales en ciertos casos suelen ser muy complejas y requieren de muchas iteraciones para llegar a una solución.

Los resultados que se obtengan de cada cálculo hidráulico serán objetos de análisis. Finalmente se presentaran todos los resultados obtenidos ordenados en sus respectivas categorías para que el diseñador tenga un catálogo completo con los predimensionamientos de canales, tuberías, rápidas, tanques repartidores de caudal y vertederos; los cuales servirán de base-guía para la elaboración de los diseños definitivos.

CAPITULO II

ESTRUCTURAS DE CONDUCCIÓN

2.1 GENERALIDADES

La conducción es el componente de un sistema de suministro que permite trasladar o conducir el agua en una determinada cantidad al lugar de uso, para el riego de una determinada área (Corcho Romero & Duque Serna, 1993, pág. 205).

Según el comportamiento hidráulico del flujo las conducciones pueden realizarse a través de:

- Canales abiertos.
- Conductos cerrados a presión en los cuales el agua se transporta por la acción de la fuerza de gravedad o son impulsadas mediante estaciones de bombeo.
- Conducciones mixtas.

Las tipologías técnicas de cada tipo de conducción (ventajas, desventajas, costos y durabilidad), son elementos importantes para decidir cuál es la más apropiada y cuál es la que mejor se acomoda a las condiciones específicas de un proyecto.

2.2 CANALES

Podemos definir un canal como un cauce que conduce el agua desde la captación o desde un almacenamiento hacia los sitios de uso. Son conductos abiertos artificiales o naturales por donde el agua se desplaza debido a la acción que ejerce la fuerza de la gravedad, pero también se considera como un canal a cualquier conducto cerrado, como por ejemplo los túneles o las tuberías, dichos elementos deben de estar trabajando parcialmente a sección llena. En estas situaciones, el flujo no está bajo ningún tipo de presión ya que

parte de su superficie está en directo contacto con el aire (Villón Bejár, 1995, pág. 15).

Existen canales contruidos de diversos materiales: en tierra, con o sin cobertura de pasto, canales en roca, canales revestidos y de mampostería. El tipo de material determina el grado de fricción con el agua, la velocidad del flujo permitida, el riesgo de erosión y el grado de filtración por las paredes.

2.2.1 NOCIONES FUNDAMENTALES EN EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CANALES

2.2.1.1 Secciones de máxima eficiencia hidráulica.

Algunos de los factores que intervienen directamente en el costo de la construcción de un canal son el volumen por excavar y el área por revestirse, para lo cual los diseños de las secciones transversales deben acercarse en lo posible, a una sección de máxima eficiencia hidráulica, que es el diseño de la sección de un canal con características geométricas, el cual teniendo una área hidráulica menor permita transportar el máximo caudal (Villón Bejár, 1995, pág. 91).

2.2.1.2 Secciones de mínima infiltración

Uno de los problemas más frecuentes que se suelen presentar en los sistemas de conducción son las grandes pérdidas de agua ocasionadas por la infiltración, la misma que dependerá de la clase del terreno. Para minimizar en lo posible estos efectos se hace necesario diseñar geoméricamente canales que transporten un caudal máximo y que tenga una pérdida de infiltración mínima (Villón Bejár, 1995, pág. 125).

2.2.2 SECCIONES MÁS FRECUENTES EN CANALES

Los canales artificiales se diseñan con formas geométricas regulares (polígonos), es decir que sus caras interiores son planas y están unidas por ángulos. Las secciones transversales más comunes son:

2.2.2.1 Sección rectangular

Son utilizados para transportar caudales pequeños, básicamente se usa para canales construidos con materiales estables como el hormigón o a su vez pueden ser edificados sobre superficies rocosas, “se puede usar este tipo de secciones para conducir caudales de hasta 200 lt/seg” (Alvear, Olazával, & Noordholland de Jong, 1999, pág. 91).

Se obtiene una máxima eficiencia hidráulica cuando la relación entre su ancho (B) y la altura del tirante de agua (y) es a $B=2y$.

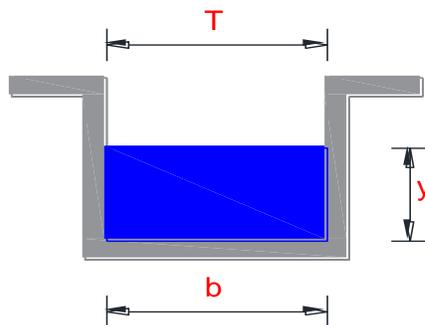


Figura 1. Canal de sección tipo rectangular.

2.2.2.2 Sección trapezoidal

Son los más utilizados, tienen un buen comportamiento hidráulico, sus taludes varían de acuerdo a la capacidad de conducción y el tipo de terreno que atraviesan. Se comporta mejor que el rectangularmente a los empujes de los terrenos.

Por argumentos hidráulicos y razones de costo se ha llegado a comprobar que:

La geometría que se comporta mejor hidráulicamente es la que tiene paredes laterales con una inclinación de 60° , o sea la que tiene un talud igual $z = 0.58$; sin embargo se recomienda utilizar taludes de 0.5 en canales pequeños y medianos por la facilidad en el proceso constructivo, en canales de mayores capacidades se utilizan taludes de 1 y hasta de 3 cuando los suelos son arenosos (Alvear, Olazával, & Noordholland de Jong, 1999, pág. 92) ver la *Tabla 1*.

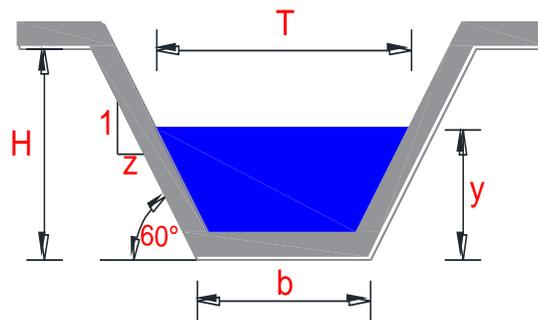


Figura 2. Canal de sección tipo trapezoidal.

2.2.2.3 Sección triangular

Este tipo de sección se usa para cunetas revestidas en las carreteras, también en canales de tierra pequeños, principalmente por facilidad de trazo.

Su máxima eficiencia se obtiene cuando su talud es igual a 1, o sea la que forma un ángulo recto en su vértice entre las paredes.

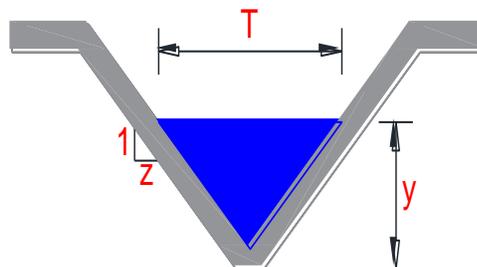


Figura 3. Canal de sección tipo triangular

2.2.2.4 Sección circular

Utilizados para trabajar parcialmente llenos, se usan en túneles, conductos cubiertos y en redes terciarias. Su máxima eficiencia se obtiene cuando su tirante coincide con la mitad del diámetro.

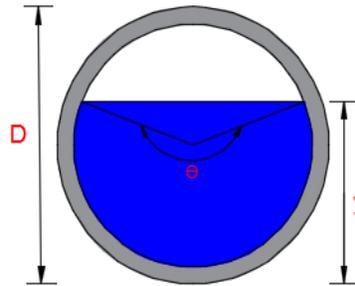


Figura 4. Canal de sección tipo circular

Tabla 1

Taludes recomendados en función del material. Talud Z:1 (H:V)

Características de los suelos	Canales poco profundos	Canales profundos
Roca en buenas condiciones	Vertical	0.25:1
Arcilla compacta o conglomerados	0.5:1	1.1
Limos arcillosos	1:1	1.5:1
Limoso-arenoso	1.5:1	2.1
Arenas sueltas	2:1	3:1

Nota. Fuente: Villón Béjar, M. (1995). Hidráulica de Canales (pag.140). Instituto Tecnológico de Costa Rica.

2.2.3 FLUJO EN CANALES

En la hidráulica de canales, los flujos a superficie libre pueden desplazarse en canales naturales y artificiales. Los canales artificiales poseen una geometría prismática regular y estos pueden ser de sección transversal cerrada y abierta; mientras que los canales naturales poseen una sección trasversal irregular.

2.2.3.1 Tipos de flujo en canales

La variable que más se estudia y analiza en la hidráulica de canales es la profundidad de la lámina de agua, pues con dicha variable es con la cual se diseña un canal artificial. Los flujos en los canales abiertos pueden clasificarse bajo tres criterios: El tiempo, el espacio y la viscosidad.

2.2.3.1.1 Flujo no permanente y permanente

Para estos tipos de flujo se utiliza como variable al tiempo. El flujo es permanente cuando la profundidad normal del flujo no cambia y se mantiene constante durante el intervalo de tiempo en mención. Inversamente puede decirse que el flujo se encuentra en estado no permanente si la profundidad del flujo cambia durante este intervalo de tiempo (Villón Bejár, 1995, pág. 43).

2.2.3.1.2 Flujo uniforme y variado

Para estos dos casos de flujo se emplea como variable al espacio. Es uniforme el flujo cuando la profundidad del flujo es constante en cada tramo del canal, es decir, todos sus parámetros (velocidad, área, tirante, etc.) se mantienen constantes con respecto al espacio. Inversamente se puede catalogar como un flujo en estado variado si los parámetros antes mencionados varían de una sección a otra (Villón Bejár, 1995, pág. 44).

2.2.3.2 Estados del flujo

El comportamiento de un flujo en los canales artificiales abiertos está regido principalmente por los efectos de viscosidad y la gravedad con relación a las fuerzas inerciales del flujo. Cuando un flujo se encuentra bajo la acción de la viscosidad puede ser turbulento, laminar y transicional. De forma análoga cuando el flujo se encuentra bajo los efectos producidos por la gravedad el flujo puede ser considerado como crítico, subcrítico y supercrítico.

2.2.3.2.1 Flujo laminar y turbulento.

El efecto que genera la viscosidad con relación a la inercia puede se representa por el número de Reynolds, el cual permite predecir el carácter de flujo si es turbulento o laminar.

Se considera como un flujo laminar cuando las fuerzas viscosas son muy fuertes a comparación de las fuerzas inerciales, es decir, cuando $Re < 500$.

De igual manera el flujo es catalogado como turbulento cuando las fuerzas viscosas son débiles en proporción a las fuerzas inerciales, es decir, $Re > 500$.

El flujo es catalogado como transicional cuando el número de Reynolds se encuentra entre $500 < Re < 2000$.

El número de Reynolds viene expresado por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{v R}{\nu} \quad (1)$$

Donde:

R= Radio Hidráulico de la sección transversal, en metros [m].

v= Velocidad Media, [m/s].

ν = Viscosidad cinemática del agua, en $[m^2/s]$.

2.2.3.2.2 Flujo crítico, subcrítico y supercrítico

El efecto que causa la fuerza de la gravedad sobre el estado de un flujo se puede representar con la relación entre las dos fuerzas que son: Las gravitacionales e inerciales, dicha proporción se la expresada con el número de Froude. Con base a éste número se puede diferenciar tres estados del flujo bien definidos los cuales son: Crítico, el subcrítico y el supercrítico.

El número de Froude viene expresado por la siguiente ecuación:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (2)$$

Donde:

v = velocidad del flujo [m/s].

g = aceleración de la gravedad [m^2/s].

L = Longitud característica de la sección [m].

A = área hidráulica [m^2].

T = ancho del espejo del agua [m].

En canales, la longitud característica viene dada por la magnitud de la profundidad media $\bar{y} = A/T$, con lo cual se obtiene la siguiente expresión:

$$F = \frac{v}{\sqrt{g\bar{y}}} \quad (3)$$

Cuando el número $F < 1.0$, se tiene un flujo subcrítico, aquí la velocidad del flujo es tranquila y baja. Cuando el número de Froude $F = 1$, el flujo es crítico, aquí la fuerza de la inercia y la gravedad se hallan en equilibrio, es decir, en esta condición no se genera resalto hidráulico. Si el número de Froude $F > 1.0$, se lo denomina como flujo supercrítico, aquí la velocidad del flujo que circula es muy alta.

2.2.4 ELEMENTOS CONTITUTIVOS

2.2.4.1 Nomenclatura

Los elementos geométricos son los que definen la forma de la sección de un canal y estos son:

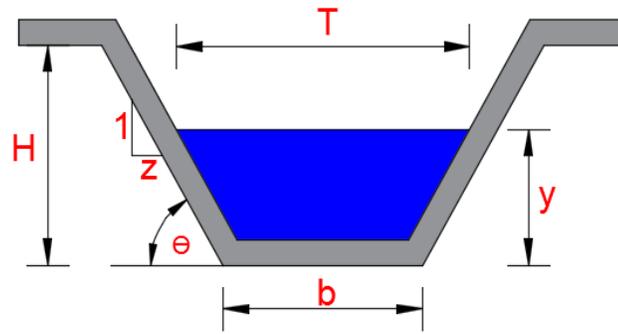
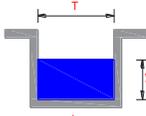
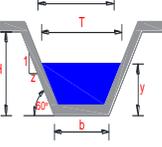
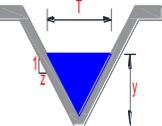
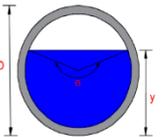


Figura 5. Elementos de la sección de un canal

- **Tirante de agua (y):** Profundidad máxima del agua en el canal [m].
- **Ancho de solera (b):** Es el ancho de la base del canal [m].
- **Espejo de agua (T):** Es el ancho de la superficie libre del agua [m].
- **Ancho de corona (C).**
- **Profundidad del canal (H):** Profundidad total del canal [m].
- **Bordo libre ($H-y$):** Es la altura de seguridad necesaria que se utiliza para absorber los niveles extraordinarios que se presentan con la crecida del caudal en épocas de invierno.
- **Angulo de inclinación de las paredes laterales con la horizontal del canal (Θ).**
- **Talud (Z):** Es la relación de la proyección horizontal a la vertical.
- **Área Hidráulica (A):** Área de la sección transversal del flujo [m^2].
- **Perímetro Mojado (P):** Contorno del conducto en contacto con el agua [m].
- **Radio Hidráulico (R):** Se establece como $R=A/P$ en [m].

Tabla 2

Relaciones geométricas de las secciones transversales más comunes en canales

Sección	Área Hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio Hidráulico R	Espejo de Agua T
	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b
	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$
	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy}{2y\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$
	$\frac{(\theta - \sin \theta)D^2}{8}$	$\frac{\theta D}{2}$	$(1 - \frac{\sin \theta}{\theta})\frac{D}{4}$	$\frac{\sin \theta}{2} \text{ o } 2\sqrt{y(D - y)}$

Nota. Fuente: Villón Béjar, M. (1995). Hidráulica de Canales (pag.34). Instituto Tecnológico de Costa Rica.

2.2.4.2 Criterios para el diseño de los tramos de un canal

Establecidos los parámetros básicos como lo son: Los trazos y caudales de diseño, se diseñan los detalles de cada tramo. Para el diseño de los trayectos se consideran los siguientes criterios específicos propuestos por: Bottega & Hoogedam, Sotelo Avila, Sviatoslav Krochin, Rocha Felices y Villón Bejár..

- La dimensión de cada tramo se basa en los caudales máximos y mínimos por conducirse a lo largo del año, es decir, en base a los estudios hidrológicos de la zona.

- Por razones de estabilidad en los taludes se recomienda emplear canales de sección trapezoidal, cuando se vaya a construir canales de tierra.
- Los canales de sección trapezoidal son los más utilizados frecuentemente, cuando se desean construir canales revestidos en hormigón, por el ahorro que representan estos en el costo. Pero también se puede optar por utilizar canales rectangulares, pues son fáciles de construir y brindan una menor pérdida de terreno.
- Cuando exista gran variación entre los caudales de una época y otra en todo el año, se recomienda usar canales de sección trapezoidal.
- El ancho mínimo que tendrá la solera de un canal es de 0.30 m para permitir el uso de las herramientas para la limpieza. Para caudales inferiores a los 20 litros/seg. Se recomienda el uso de tubería.
- La velocidad mínima debe garantizar que no se produzca problemas con la sedimentación en el fondo del canal. Su valor absoluto depende de la cantidad y el tipo de material sólido en suspensión. En los canales de tierra la velocidad mínima debe ser 0.3 m/s, en canales revestidos 0.6 m/s.
- Es recomendable que en los canales de riego se mantenga un flujo subcrítico. También es necesario considerar las velocidades máximas permisibles para evitar problemas con la erosión en la solera y las paredes del canal. Desniveles mayores de la topografía se salvan mediante la implementación de las rápidas.
- Cuando se construyan canales en laderas con peligro de derrumbes o deslizamientos, se los debe proteger con una tapa o losa de hormigón.
- Las coronas de los bordos deben tener un ancho de por lo menos 0.6m para permitir el caminar al lado del canal. En los canales en laderas,

solo el bordo exterior debe ser de 0.3 m, el bordo interior puede ser de hasta 0.2 m.

- El bordo libre debe tener una altura de seguridad 1/3 del tirante de agua (y).
- Para canales revestidos con hormigón se suele recubrir con espesores que van desde los 5 a 8 cm para canales pequeños y medianos, y para canales medianos y grandes se suele manejar espesores que van desde los 10 hasta los 15 cm.
- El coeficiente de rugosidad depende del material que se elija para el revestimiento del canal.

2.2.5 DISEÑO HIDRÁULICO DE CANALES

Para el diseño de un sistema de conducción para riego se considera que los flujos de agua son uniformes no-permanentes. La fórmula más utilizada por los ingenieros para el cálculo del flujo en canales abiertos es la de ecuación de Manning y viene expresada de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Donde

Q = caudal [m^3/s].

A = área hidráulica [m^2].

n = coeficiente de rugosidad.

R = radio hidráulico [m].

S = pendiente [m/m].

Los canales abiertos se pueden diseñar utilizando dos procedimientos iterativos:

1. Cuando se conoce el caudal a transportar. Aquí en este caso se tendrá de asumir un valor tentativo de la base (b) que tendrá el canal y mediante iteraciones determinar la altura del tirante de agua (y).
2. Cuando se conoce la geometría del canal. Aquí en este caso, se deberá imponer la base (b) y la altura del tirante del agua (y) a fin de determinar el caudal deseado a transportar.

Previamente se deberá establecer los valores de los parámetros básicos para ambos casos, los cuales son:

- El caudal deseado a transportar en $Q [m^3/s]$.
- La pendiente $S [m/m]$, según la topografía del terreno.
- La rugosidad “n”, según material de construcción.
- El tipo de sección por aplicarse y el talud z.

2.2.5.1 Procedimiento para el cálculo hidráulico de canales abiertos

1. El procedimiento que se sigue para determinar las dimensiones geométricas de un canal conocido el caudal es el siguiente:
 - a) Se calcula la capacidad de transporte K, que se obtiene de un reordenamiento de la fórmula de Manning.

$$K = \frac{Qn}{\frac{1}{S^2}} = AR^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

Reemplazando el valor de $R=A/P$ en la expresión (5) tenemos.

$$K = \left(\frac{Qn}{\frac{1}{S^2}}\right)^3 = \frac{A^5}{P^2} \quad (6)$$

- b) El valor de K calculado con los valores de Q, S y n, se usa posteriormente para realizar una comparación con la

relación $\frac{A^5}{P^2}$ mediante tanteos de los valores de “y” o “b”, las fórmulas utilizadas para determinar el valor del área hidráulica y el perímetro mojado de la sección de un canal se encuentran en la *Tabla 2*.

- c) Determinar la velocidad del flujo en la sección del canal, el cual será utilizado para calcular el número de Froude.
 - d) Calcular el bordo libre del canal.
2. El procedimiento que se sigue para determinar el caudal a transportar cuando se conoce la geometría del canal es el siguiente:
- a) Imponer valores iniciales tanto de la base (b) y la altura del tirante del agua (y).
 - b) Calcular el área, perímetro mojado y el radio hidráulico de la sección del canal. Con estos datos utilizar la ecuación (4) propuesta por Manning y comparar si se cumple la igualdad; caso contrario volver a repetir los procedimientos antes descritos.
 - c) Determinar la velocidad del flujo en la sección del canal, el cual será utilizado para calcular el número de Froude.
 - d) Calcular el bordo libre del canal.

2.2.5.2 Ejemplo de calculo

Se desea conducir un caudal de 100 litros/seg. Para ello se plantearon dos alternativas de diseño; el primero con un canal trapezoidal con un talud $z=1$ y el segundo un canal de sección rectangular. Utilizar los dos procedimientos descritos en la sección anterior, para ello se cuenta con los siguientes datos adicionales:

- $Q=0.10 \text{ m}^3/\text{s}$
- $S=0.001$

- $n= 0.013$
- $b=0.30 \text{ m}$

Diseño del canal trapezoidal.

1. El procedimiento que se sigue para determinar las dimensiones geométricas de un canal conocido el caudal es el siguiente:

a) Se calcula la capacidad de transporte K , que se obtiene de un reordenamiento de la fórmula de Manning.

$$K = \left(\frac{Qn}{S^2}\right)^3 = \frac{A^5}{P^2}$$

$$K = \left(\frac{0.1 \cdot 0.013}{0.001^2}\right)^3$$

$$K = 0.00006947$$

b) El valor de K calculado con los valores de Q , S y n , se usa posteriormente para realizar una comparación con la relación $\frac{A^5}{P^2}$ mediante tanteos de los valores de “ y ”. Con $b=0.30 \text{ m}$, se asume un valor inicial de $y=0.25 \text{ m}$.

Primera iteración

$$A = (b + zy)y$$

$$A = (0.30 + 1 \cdot 0.25) \cdot 1$$

$$A = 0.14 \text{ m}^2$$

$$A^5 = 0.00004914$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$$

$$P = 0.30 + 2 \cdot 0.25\sqrt{1 + 1^2}$$

$$P = 1.01 \text{ m}$$

$$P^2 = 1.014$$

$$\frac{A^5}{P^2} = 0.0004845$$

Comparando $\frac{A^5}{P^2} < K$, se debe aumentar el valor del tirante de agua y.

Segunda iteración

Se asume $y=0.26m$

$$A = (b + zy)y$$

$$A = (0.30 + 1 \cdot 0.26) \cdot 1$$

$$A = 0.1456 \text{ m}^2$$

$$A^5 = 0.00006543$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$$

$$P = 0.30 + 2 \cdot 0.26\sqrt{1 + 1^2}$$

$$P = 1.04 \text{ m}$$

$$P^2 = 1.072$$

$$\frac{A^5}{P^2} = 0.0006103$$

Comparando $\frac{A^5}{P^2} < K$, se debe aumentar el valor del tirante de agua y.

Tercera iteración

Se asume $y=0.27m$

$$A = (b + zy)y$$

$$A = (0.30 + 1 \cdot 0.27) \cdot 1$$

$$A = 0.1539 \text{ m}^2$$

$$A^5 = 0.00008633$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$$

$$P = 0.30 + 2 \cdot 0.27\sqrt{1 + 1^2}$$

$$P = 1.06 \text{ m}$$

$$P^2 = 1.1314$$

$$\frac{A^5}{P^2} = 0.0007630$$

Comparando $\frac{A^5}{P^2} \approx K$, por lo tanto se asume que $y=0.27$ m es la altura del tirante de agua que tendrá el canal trapezoidal.

- c) Determinar la velocidad del flujo en la sección del canal el cual será utilizado para calcular el número de Froude.

Velocidad

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0.10}{0.1539}$$

$V = 0.67$ m/s > Velocidad mínima de sedimentación de 0.6 m/s, por lo que cumple con este requerimiento.

Numero de Froude

$$F = \frac{v}{\sqrt{g\bar{y}}}$$

$$F = \frac{0.67}{\sqrt{9.81 \cdot 0.27}}$$

$F = 0.68 < 1$, Por lo tanto el flujo se encuentra en estado subcrítico.

- e) Calcular el bordo libre del canal.

$$Bl = \frac{y}{3}$$

$$Bl = \frac{0.27}{3}$$

$$Bl = 0.13 \text{ m}$$

$$H = Bl + y = 0.40 \text{ m}$$

Las medidas definitivas del canal son:

$$b=0.30 \text{ m y } H= 0.40 \text{ m}$$

Diseño del canal rectangular.

2. El procedimiento que se sigue para determinar el caudal a transportar cuando se conoce la geometría del canal es el siguiente:

- a) Imponer valores iniciales tanto de la base (b) y la altura del tirante del agua (y). Para este caso se asumirá que $b=y$.
Por lo tanto $b= 0.30$ m y $y= 0.30$ m.
- b) Calcular el área, perímetro mojado y el radio hidráulico de la sección del canal.

Primera iteración

$$A = b \cdot y$$

$$A = 0.30 \cdot 0.30$$

$$A = 0.09 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y$$

$$P = 0.30 + 2 \cdot 0.30$$

$$P = 0.9 \text{ m}$$

$$R = \frac{by}{b + 2y}$$

$$R = \frac{0.09}{0.9}$$

$$R = 0.10 \text{ m}$$

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{0.013} (0.09) \cdot (0.10)^{\frac{2}{3}} \cdot (0.001)^{\frac{1}{2}}$$

Comparando $0.10 \text{ m}^3/\text{s} \neq 0.047 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo tanto se debe aumentar la sección del canal.

Se asume $b=0.35$ m y $y=0.35$ m

Segunda iteración

$$A = b \cdot y$$

$$A = 0.35 \cdot 0.35$$

$$A = 0.1225 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y$$

$$P = 0.35 + 2 \cdot 0.35$$

$$P = 1.05 \text{ m}$$

$$R = \frac{by}{b + 2y}$$

$$R = \frac{0.1225}{1.05}$$

$$R = 0.12 \text{ m}$$

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{0.013} (0.1225) \cdot (0.12)^{\frac{2}{3}} \cdot (0.001)^{\frac{1}{2}}$$

Comparando $0.10 \text{ m}^3/\text{s} \neq 0.071 \text{ m}^3/\text{s}$, por lo tanto se debe aumentar la sección del canal.

Se asume $b=0.40 \text{ m}$ y $y=0.40 \text{ m}$

Segunda iteración

$$A = b \cdot y$$

$$A = 0.40 \cdot 0.40$$

$$A = 0.16 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y$$

$$P = 0.40 + 2 \cdot 0.40$$

$$P = 1.20 \text{ m}$$

$$R = \frac{by}{b + 2y}$$

$$R = \frac{0.16}{1.20}$$

$$R = 0.13 \text{ m}$$

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

$$Q = \frac{1}{0.013} (0.16) \cdot (0.13)^{\frac{2}{3}} \cdot (0.001)^{\frac{1}{2}}$$

Comparando $0.10 \text{ m}^3/\text{s} \approx 0.102 \text{ m}^3/\text{s}$, Ok.

- c) Determinar la velocidad del flujo en la sección del canal, el cual será utilizado para calcular el número de Froude.

Velocidad

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0.10}{0.16}$$

$V = 0.635 \text{ m/s} >$ Velocidad mínima de sedimentación de 0.6 m/s, por lo que cumple con este requerimiento.

Numero de Froude

$$F = \frac{v}{\sqrt{g\bar{y}}}$$

$$F = \frac{0.635}{\sqrt{9.81 \cdot 0.40}}$$

$F = 0.32 < 1$, Por lo tanto el flujo se encuentra en estado subcrítico.

f) Calcular el bordo libre del canal.

$$Bl = \frac{y}{3}$$

$$Bl = \frac{0.40}{3}$$

$$Bl = 0.15 \text{ m}$$

$$H = Bl + y = 0.55 \text{ m}$$

Las medidas definitivas del canal son:

$$b=0.40 \text{ m } y= 0.40 \text{ H}= 0.55 \text{ m}$$

2.3 TUBERIAS

Bottega & Hoogedam (2012) considerada que una tubería es "la sucesión de piezas especiales y tubos, que unidas adecuadamente pueden formar una estructura para la conducción de agua , es decir el agua escurre por un espacio cerrado generalmente de forma circular a sección llena y bajo presión "(pág. 57).

Autores como: Bottega & Hoogedam, Saldarriaga y Rocha Felices recomiendan emplear una conducción por tuberías en los siguientes casos:

- Cuando los caudales a conducir son relativamente pequeños que resulta económicamente más conveniente conducirlos por tubería antes que construir pequeños y más costosos canales, generalmente para caudales inferiores a los 20 litros/seg . Aunque la decisión final que se debe de adoptar obedezca a un análisis económico específico.
- Cuando el suelo de la ladera por donde se quiere llevar el agua es inestable y amenaza constantemente con derrumbes que pongan en serio riesgo la operación de un canal.
- Es habitual el uso de tuberías cuando se desee cruzar ríos en pasos elevados.
- Se recomienda colocar tuberías en lugar de construir un canal cuando el terreno es muy rocoso y la construcción se hace muy costosa y difícil.
- Para atravesar zonas urbanas.
- Es utilizado en sistemas de riego por aspersión y por goteo.
- Cuando el riego es por bombeo.

Algunas ventajas que presentan la conducción por tubería son:

- La principal ventaja de la conducción en tuberías es mantener libre de contaminación el agua de riego (tierra y basura). Adicionalmente, no

hay pérdidas de agua por evaporación, por filtraciones y por vegetación circundante.

- Tienen mayor durabilidad y requieren de poco mantenimiento.
- Requieren menos mantenimiento que los canales abiertos.
- Su proceso constructivo es sumamente simple y muy rápido, sobre todo cuando se utilizan las tuberías con uniones.

Algunas desventajas que presentan la conducción por tubería son:

- Son conductos de un costo económico alto, sobre todo para caudales grandes.
- Necesita grandes desniveles; si no se hace extremadamente caro.
- Para evitar taponamientos en sifones necesita estructuras con válvulas de limpieza.
- Necesita estructuras a la entrada para evitar el ingreso de materiales y sedimentos.
- El agua no está a la vista, y cualquier problema tal como corrosión u obstrucción no es visible.
- Las reparaciones son dificultosas y costosas.
- Su capacidad de conducción no es tan flexible como la de los canales abiertos, cuyo bordo libre permite conducir un caudal adicional en épocas de invierno.

2.3.1 LINEA DE CONDUCCIÓN

Arocha Revelo (1977) define a la línea de conducción como "al conjunto de válvulas, accesorios, tuberías y estructuras encargados de conducir el agua desde el lugar en donde se realiza la captación hasta el lugar en donde se pretende reservar o repartir el líquido vital" (pág. 109); debido a la irregularidad topográfica que posee las zonas montañosas se deberá aprovechar convenientemente la carga estática existente. Además se debe utilizar al máximo la energía disponible para conducir el caudal deseado, lo que en la

mayoría de los casos lleva a realizar un proceso de selección del diámetro mínimo requerido, el cual deberá permitir presiones de menor magnitud o similares a la resistencia física que el material de la tubería pueda soportar. Precedente al diseño de tuberías con flujo a presión deberán conocerse algunas definiciones que se presentan a continuación:

1. **Pérdida de carga unitaria o la pendiente (hf o S):** Representa la pérdida de energía en la tubería por unidad de longitud debido a la resistencia que ejerce el material del conducto hacia el flujo del agua. Generalmente se lo expresa en términos de m/m o en m/km.
2. **Pérdida por tramo (H_f):** Representa el producto entre la pérdida de carga unitaria por la longitud de la trayectoria que tendrá la tubería.
3. **Carga dinámica:** En cualquier punto de la línea, simboliza la diferencia que existe entre la pérdida de carga por fricción y la carga estática en la tubería.
4. **Carga estática:** Representa el desnivel que existe desde el lugar de donde se pretende llevar el agua hasta su lugar de almacenamiento o distribución.
5. **Línea piezométrica o de gradiente hidráulica:** Es el elemento que muestra la presión en columna de agua a lo largo de toda la trayectoria de la tubería bajo condiciones de operación.

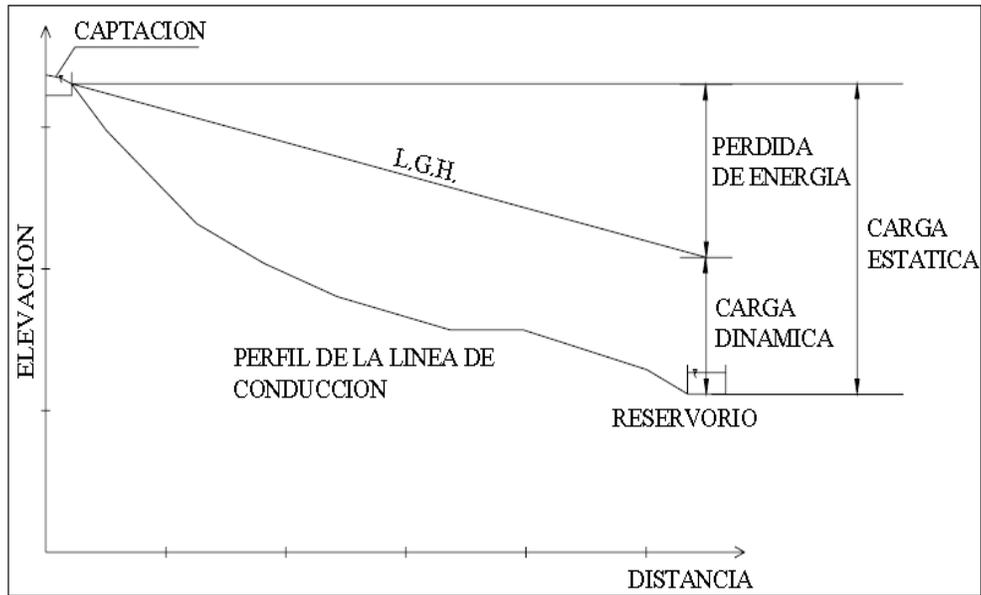


Figura 6. Cargas estáticas y dinámicas de la línea de conducción. Fuente: Guía de diseños para líneas de conducción e impulsión de sistema de abastecimientos de agua rural

2.3.2 CRITERIOS DE DISEÑO

Una vez que se define el trazo del perfil de la línea de conducción, es preciso considerar criterios de diseño que permitan un planteamiento final al proyecto; estos parámetros se recopilan a continuación:

- Carga disponible o diferencia de elevación.
- Capacidad para transportar el gasto máximo.
- La clase de tubería que es apta para soportar las presiones hidrostáticas.
- La clase de tubería, en función del material que la naturaleza del terreno así lo exija.
- Diámetros.

2.3.3 ELEMENTOS DE UNA OBRA DE CONDUCCIÓN

2.3.3.1 *Tanques rompe presión.*

Es una estructura que permite disipar la energía del agua, cuyo propósito es el de reducir la presión relativa prácticamente a cero para evitar daños en la tubería por la sobrepresión. “Los tanques rompe presión deben construirse a cada 50 metros de desnivel; su dimensión está de acuerdo al diámetro y caudal que circule por las tuberías” (Tixe, 2004, pág. 8).

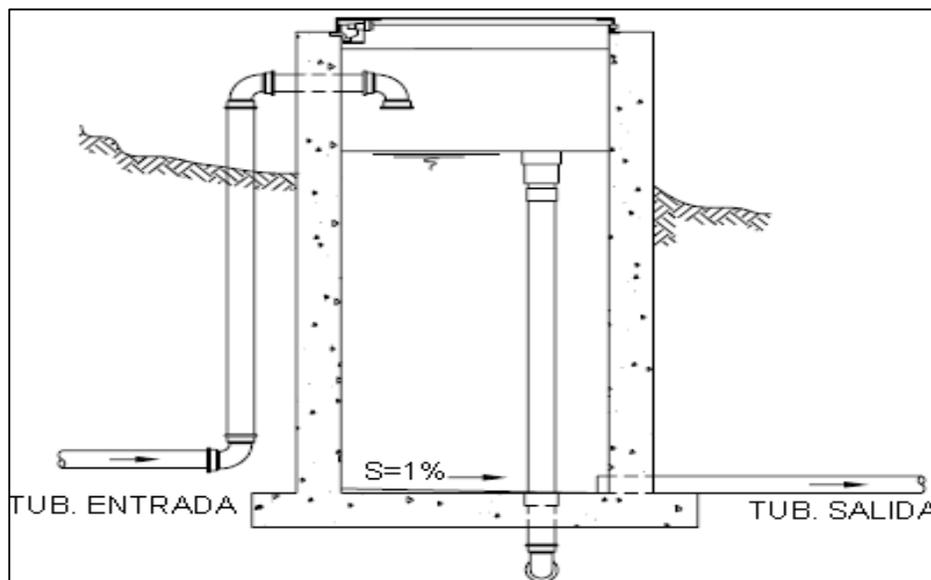


Figura 7. Tanque rompe presión. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastamientos de agua rural

2.3.3.2 *Tuberías de conducción.*

Es el componente principal y más costoso de este tipo de obras de conducción a gravedad. La tubería puede ser de distinto tipo de material y ser de un diámetro único o, a lo largo del tendido, tener distintos diámetros. Cada tubo tiene una serie de características intrínsecas como diámetro nominal (diámetro exterior del tubo), diámetro interior y espesor nominal (grosor del tubo) y la presión de trabajo (presión máxima interior a que estará la tubería en servicio).

Las tuberías más utilizadas en nuestro medio para conducir el agua son:

2.3.3.2.1 Tuberías de polietileno (P.E.)

Son tubos elaborados a partir de aditivos y de resinas de polietileno; su superficie exterior e interior es prácticamente lisa, sin costura y sin roscas. El polietileno es un tipo de material el cual caracteriza por poseer un cierto grado de elasticidad (permite pequeñas curvaturas) y resistencia química. Su densidad varía desde $(0.940 \leq d < 0.926 \text{ g/cm}^3)$.

La ventaja principal que presentan los tubos de polietileno a comparación de las tuberías de PVC es que estas pueden permanecer a la intemperie durante mucho tiempo y sin descomponerse. Además que su instalación es sumamente fácil, también estos vienen en rollos de grandes longitudes que van desde los 25m a los 100m.



Figura 8. Tubería de polietileno. Fuente: PLASTIGAMA

La oferta local de tubos de PE Flex se resume en la siguiente tabla:

Tabla 3

Tuberías Flex

Especificaciones para tuberías de polietileno uso en presión diámetro interior controlado según norma ASTM 2239								
Diámetro		Tipo de PE	Espesor nominal	Diámetro Exterior promedio	Presión de trabajo			Longitud Rollo
Nominal	Interior promedio				psi	MPa	Kg/cm22	
plg	mm		mm	mm				m
1/2	15.80	BD	1.75	22.25	80	0.55	5.63	100
		BD	2.97		125	0.86	8.80	100
		MD	2.97		160	1.10	11.26	100
3/4	20.93	BD	2.43	26.74	80	0.55	5.63	100
		BD	2.67		91	0.63	6.40	100
		BD	2.99		100	0.69	7.04	100
		BD	3.94		125	0.86	8.80	100
		MD	3.94		160	1.10	11.26	100
1	26.64	BD	2.64	32.39	72	0.50	5.07	100
		BD	5.03		125	0.86	8.80	100
		MD	5.03		160	1.10	11.26	100
1 1/2	40.89	BD	3.14	47.69	57	0.39	4.01	100
2	52.50	BD	4.57	62.30	64	0.44	4.50	100
3	77.93	BD	5.66	90.71	57	0.39	4.04	50
4	102.26	BD	7.85	118.95	57	0.39	4.01	25

Nota. Fuente: Tuberías PLASTIGAMA

2.3.3.2.2 Tuberías de (P.V.C).

Las tuberías de plástico o de PVC como comúnmente se las conoce; están fabricadas con un material denominado policloruro de vinilo, los tubos de este tipo de material se encuentran fácilmente en el mercado ecuatoriano y se fabrican en diámetros de hasta 1245 mm y estos vienen en tramos de 6 m de largo.

Las ventajas que poseen las tuberías de PVC en general son:

- Poseen una resistencia alta a la corrosión.

- No necesitan de revestimiento y tienen un bajo costo de mantenimiento.
- Poseen un peso bajo, lo que facilita el transporte y su manipulación.
- Su superficie interior es prácticamente lisa, lo que genera mínimas pérdidas por fricción y una baja acumulación de sedimentos.
- Debido a su gran adaptabilidad a casi todo tipo de terrenos, estas tuberías pueden enterrarse con poca obra civil o hacer tramos mixtos.

Algunas desventajas que presentan las tuberías plásticas se las menciona a continuación:

- El material se degrada con los rayos solares, para evitar este desgaste es necesario pintar regularmente la superficie exterior de la tubería con pinturas especiales o enterrarla.
- Posee un alto coeficiente térmico. Cuando existe aumento en la temperatura de la tubería estas sufren dilataciones y contracciones importantes.
- Estas tuberías de plástico tienen una baja resistencia auto portante, lo que significa que necesitan estructuras de soporte para cruzar una depresión topográfica.



Figura 9. Tubería PVC. Fuente PLASTIGAMA

2.3.3.3 Válvulas.

Las válvulas son dispositivos mecánicos que tienen como propósito principal el control del flujo de agua en una red de conducción. El control puede radicar en detener o iniciar un flujo, regular un flujo, evitar un retorno de fluido y regular la presión de un fluido. En los sistemas de conducción con tuberías es común utilizar los siguientes tipos de válvula:

2.3.3.3.1 Válvulas de limpieza y de aire

Las válvulas de limpieza pueden estar ubicadas en la conducción principal y secundaria, al final de pasos elevados, sifones, etc. Las válvulas de aire ayudan a expulsar el aire que se encuentra en las tuberías cuando estas se llenan y causan taponamientos en las tuberías.

Las válvulas de limpieza permiten limpiar las conducciones. Se recomienda que las válvulas de limpieza y de aire estén en tanques de hormigón (cajas) con tapas de tol galvanizado u hormigón para evitar daños o sustracción.

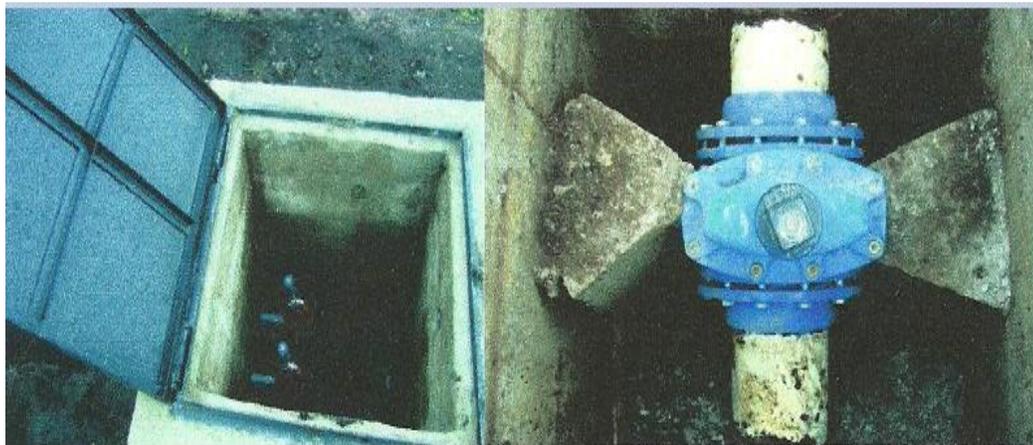


Figura 10. Válvula de limpieza y de aire. Fuente GADPC.

2.3.3.3.2 Válvulas reguladoras de presión

Permiten dividir la tubería de la distribución principal y secundaria en secciones, cuando existen pendientes muy pronunciadas, para que cada sección de la tubería tenga la presión para su normal funcionamiento y evitar la rotura de la tubería. Hay válvulas de diferente diámetro, de acuerdo al tamaño de las tuberías.



Figura 11. Válvula reguladora de presión. Fuente GADPC.

2.3.3.4 Uniones o Juntas

Son los accesorios que unen por sus extremos un tubo con otro.

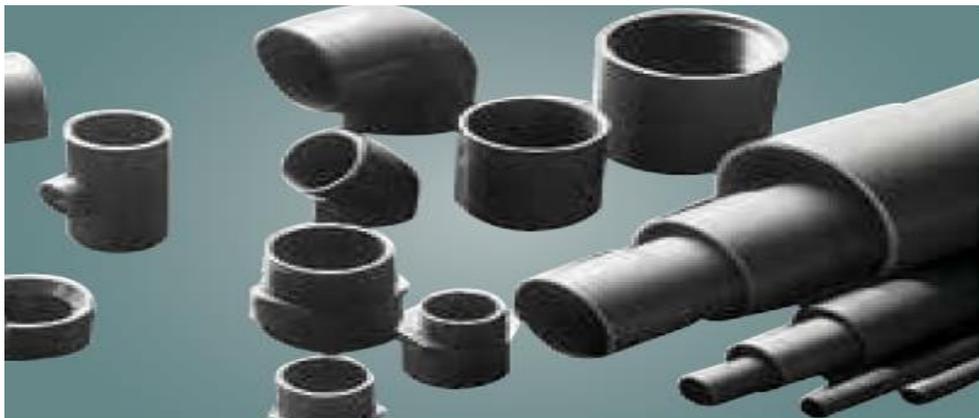


Figura 12. Uniones para tuberías PVC. Fuente PLASTIGAMA

2.3.4 DISEÑO HIDRÁULICO DE TUBERÍAS

El diseño de conducciones entubadas debe primordialmente limitarse a los valores máximos y mínimos admisibles de presión y velocidad que definen a cada tubería de cierto material y cierto espesor, con el único propósito de evitar problemas debidos a la erosión en el interior de las tuberías y dislocamientos en las uniones. En tal virtud, “la presión dinámica mínima en la línea de conducción será de 5 m y el diámetro mínimo de las tuberías en la línea de conducción será de 25mm (1pulgada)” (SENAGUA, 2012, pág. 35).

Para el uso de tuberías, se recomienda “que las velocidades del agua no sean inferiores a 0,6 m/s para prevenir el depósito de sedimentos (nunca menor a 0,3 m/s), ni mayores a 3 m/s, porque podrían originar roturas por sobrepresiones al cerrar el sistema” (García, Ramilo, & Alcoba, 2013, pág. 73).

La expresión propuesta por Bernoulli es el punto de partida de referencia que se toma para realizar el análisis de las tuberías que trabajan a presión; dicha ecuación nos indica el comportamiento que tiene el agua cuando este se mueve dentro de un conducto cerrado.

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_f + \sum h_m \quad (7)$$

Donde:

p = Presión a la que está sometido el flujo en determinada sección [kg/m^2].

γ = Peso específico del agua [kg/m^3].

z = Altura media de la sección analizada, respecto de nivel de referencia [m].

v = Velocidad media del agua en la sección analizada [m/s].

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2].

h_f = Pérdida de carga por fricción a lo largo de la tubería [m].

$\sum h_m$ = Suma de pérdidas de carga menores debidas a perturbaciones locales [m].

Si $V_1 = V_2$ y como el punto inicial está a presión atmosférica, o sea $P_1=0$
Entonces:

$$\frac{P_2}{\gamma} = z_1 - z_2 - H_f - \sum h_m \quad (8)$$

Por lo tanto la presión residual que se obtendrá en la tubería, vendrá dado por la siguiente expresión:

$$P = \Delta z - H_f - \sum h_m \quad (9)$$

Esta presión vendrá expresada en m.c.a (metros de columna de agua), los fabricantes de tuberías suelen trabajar con presiones que viene representados en kg/cm^2 , de ahí la importancia de la conversión de las unidades.

$$1 \frac{kg}{cm^2} = 10 \text{ m. c. a} = 1 \text{ atmósfera} = 10 \text{ metros de desnivel de tubería} = 1 \text{ bar}$$

Para poder conducir el caudal de diseño es necesario que las pérdidas de carga deban ser menores al desnivel del terreno, es decir $H_f < \Delta z$.

Las pérdidas de carga $h_m = km \frac{v^2}{2g}$, debidas a las perturbaciones locales del flujo en el conducto, tales como entradas, codos, válvulas y salidas pueden representarse individualmente por un coeficiente de pérdida menor km , en la *Tabla 4* se indica los valores correspondientes a cada accesorio.

Tabla 4
Coefficientes de pérdida de distintos accesorios

Accesorio	km
Válvula de globo, completamente abierta	10.0
Válvula en ángulo, completamente abierta	5.0
Válvula de retención, completamente abierta	2.5
Válvula de compuerta, completamente abierta	0.2
Válvula de compuerta, con $\frac{3}{4}$ de apertura	1.00 - 1.15
Válvula de compuerta, con $\frac{1}{2}$ de apertura	5.6
Válvula de compuerta, con $\frac{1}{4}$ de apertura	24.0
Codo de radio corto ($r/D = 1$)	0.9
Codo de radio grande ($r/D \approx 1.5$)	0.6
Codo de 45°	0.4 - 0.42
Retorno (curva en U)	2.2
Te en sentido recto	0.3
Te a través de la salida lateral	1.8
Unión	0.3
Ye de 45° , en sentido recto	0.3
Ye de 45° , salida lateral	0.8
Entrada recta a tope	0.5
Entrada con boca acampanada	0.1
Entrada con tubo reentrante	0.9
Salida	1.0

Nota. Fuente: Saldarriaga, Juan .(2007).Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos (pág. 141).

La línea de conducción requiere de una presión mínima para garantizar que el sistema funcione correctamente. En tal virtud, la presión residual deberá ser mayor a la presión mínima indicada anteriormente en la norma.

Una presión residual positiva indica que hay un exceso de energía gravitacional, esto nos indica que existe suficiente energía para poder transportar el flujo. En cambio una energía residual negativa indica que no hay suficiente energía gravitacional para poder mover la cantidad de agua deseada. De presentarse este caso se optarán por dos posibles soluciones

- Volver a trazar la Línea de gradiente hidráulica (L.G.H) usando un menor caudal.
- Utilizar un diámetro mayor de tubería con el propósito de tener en todo el tramo de la tubería una carga operativa de agua positiva.

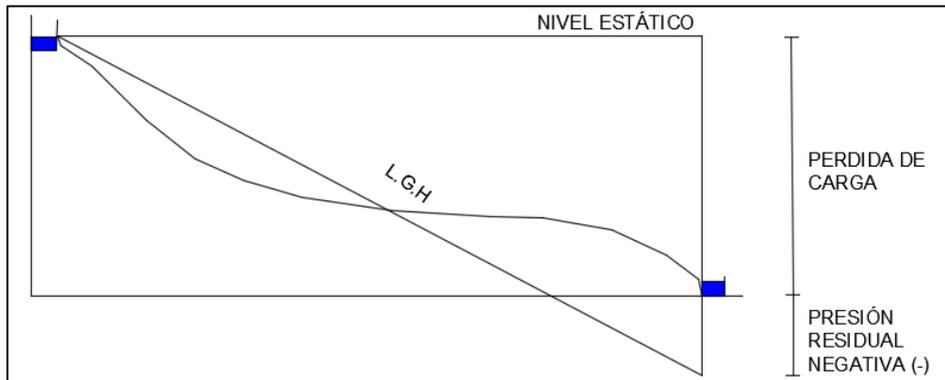


Figura 13. Presión negativa. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimientos de agua rural

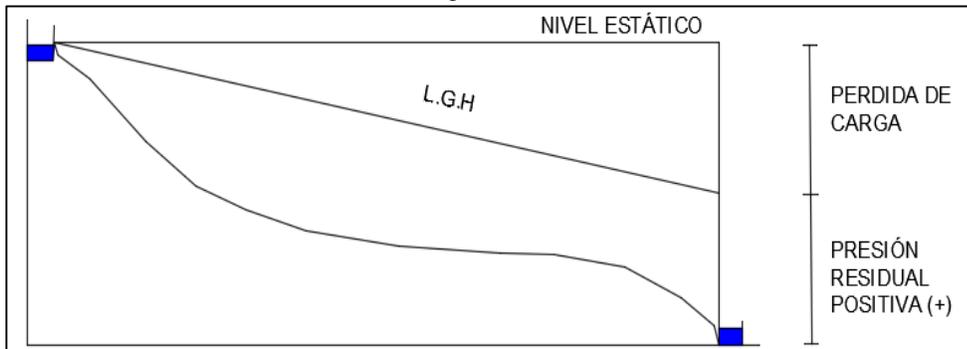


Figura 14. Presión residual positiva. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimientos de agua rural

En la práctica, cuando los sistemas tienen distancias largas, las conexiones no se toman en cuenta porque las pérdidas de carga son mínimas, y se calculan sólo las generadas por los accesorios mayores, como válvulas de regulación o cierre. Otra alternativa que se utiliza para facilitar el cálculo de las pérdidas de carga por accesorios, es “aumentar las pérdidas ya calculadas en la tubería entre un 5 y un 15%” (García, Ramilo, & Alcoba, 2013, pág. 76).

El diseño de la línea de conducción se inicia desde la captación. En este punto la presión es igual a la presión atmosférica, es decir la presión se asume como cero. Similar criterio debe aplicarse cuando se considera en el diseño como punto de partida un tanque rompe presión.

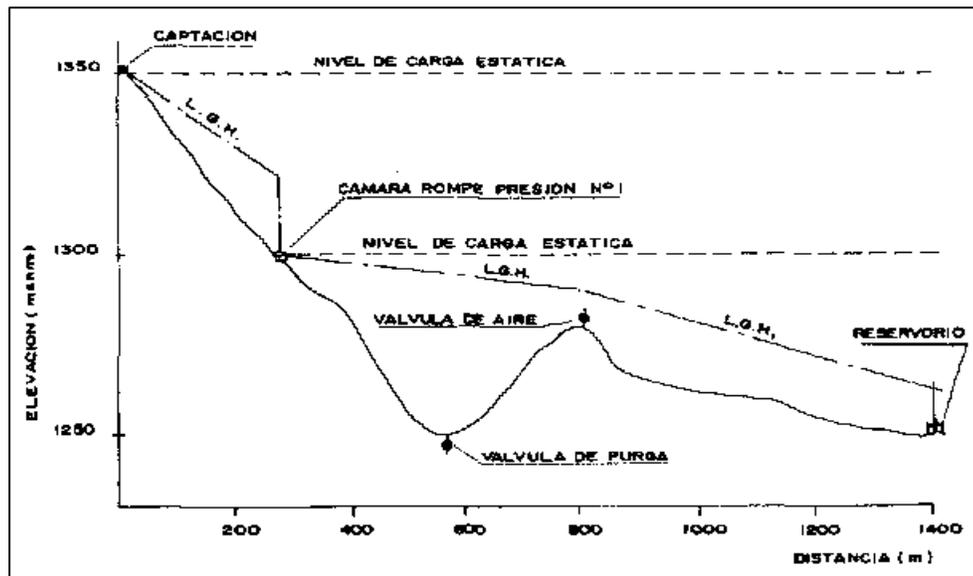


Figura 15. Ubicación de estructuras complementarias. Fuente: Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimientos de agua rural

Para el cálculo de las pérdidas de carga en las tuberías a presión se podrán utilizar las formulas generalmente aceptadas por los ingenieros, como por ejemplo, la fórmula de Hazen-Williams, Colebrook-White, Darcy-Weisbach, etc.

En este manual se utilizara la ecuación propuesta por Hazen-Williams, debido a su facil manejo.

2.3.4.1 Diseño de tuberías utilizando la ecuación empírica de Hazen-Williams.

Cuando se desconozca el valor exacto de la rugosidad absoluta (ϵ) empleada en la ecuación de Darcy-Weisbach, Cordero O (1984) recomienda “utilizar la ecuación de Hazen-Williams, que es una expresión puramente empírica y se basa en muchas experiencias en tuberías, usando como fluido agua en flujo turbulento” (pág. 69).

Los límites, establecidos claramente para la aplicación de la ecuación de Hazen-Williams son los siguientes:

- El fluido debe ser aguas a temperaturas normales.
- El diámetro debe ser superior o igual a 75mm (3 pulgadas).
- Las velocidades en las tuberías deben ser inferiores a 3 m/s (10 pies/s).

La expresión de Hazen-Williams para tuberías con un flujo uniforme y permanente es la siguiente:

$$V = 0.8594 \cdot C \cdot R^{0.63} \cdot S^{0.54} \quad (10)$$

Donde:

V= Velocidad media [m/s].

R= Radio hidráulico [R=D/4].

S= Pérdida de carga de energía unitaria [S=Hf/L] viene expresada en [m/m o en m/km].

C= Coeficiente de la rugosidad relativa de Hazen -Williams (Chow).

La ecuación de Hazen-Williams en función del Caudal, se representa de la siguiente manera:

$$Q = 0.285 \cdot C \cdot D^{2.63} \cdot S^{0.54} \quad (11)$$

Donde:

Q= Caudal que circula por la tubería [m^3/s].

C= Coeficiente de la rugosidad relativa de Hazen Williams (Chow).

D= Diámetro de la tubería[m].

S= Pérdida de carga de energía unitaria viene expresada en [m/m o en m/km].

La pérdida de carga por fricción H_f para Hazen-Williams viene dada por la siguiente expresión:

$$H_f = 10.665 \cdot \frac{Q^{1.852} \cdot L}{D^{4.87} \cdot C^{1.852}} \quad (12)$$

Donde:

H_f = Pérdidas de carga por fricción a lo largo de la tubería [m].

Q= Caudal que circula por la tubería [m^3/s].

L= Longitud de la tubería [m].

C= Coeficiente de la rugosidad relativa de Hazen Williams (Chow).

D= Diámetro de la tubería[m].

De la ecuación (11), despejando el diámetro se obtiene la siguiente expresión:

$$D = \frac{1.6117 \cdot Q^{0.380}}{C^{0.380} \cdot S^{0.205}} \quad (13)$$

El valor que se adopta para el coeficiente de la rugosidad relativa (C), se indica a continuación.

Tabla 5
Coeficientes de Chow para la fórmula de Hazen – Williams

Tipo de conducto	Coeficiente C
Acero corrugado	60
Acero galvanizado	125
Asbesto - cemento	140
Cobre	130
PVC,PE	140 - 150
Hormigón liso	130
Hormigón ordinario	120
Hierro fundido nuevo	130
Hierro fundido viejo	90

Nota. Fuente: CPE INEN 005 parte 9-1:92, (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes (pág.117)

2.3.4.1.1 Procedimiento

Se requiere contar con los siguientes datos.

- Caudal [Lts/seg].
- Datos topográficos.
- Longitud de la tubería [m].
- Material de la tubería
- Presión mínima requerida [m].

Los pasos para el diseño del diámetro de una tubería es el siguiente:

1. Se debe realizar un análisis preliminar con la finalidad de verificar que las pérdidas de carga sean menores al desnivel del terreno

$H_f < \Delta z$ y que la presión residual en el sistema sea positiva, esto garantiza que existe suficiente energía para poder transportar el caudal deseado. Los pasos que se siguiente se describen a continuación:

- a) Se determina la carga en el sistema.

$$\Delta H = (Cota S_{salida}) - (Cota L_{llegada})$$

- b) Calculamos la pérdida de carga unitaria [m/km]., o también conocido como la pendiente, está viene dada por siguiente expresión:

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

- c) Se calcula el diámetro que se necesitara en la conducción utilizando la ecuación (13), y luego se ajusta este diámetro a la oferta local.

$$D = \frac{1.6117 \cdot Q^{0.380}}{C^{0.380} \cdot S^{0.205}}$$

- d) Determinar la perdida carga por fricción en el tramo utilizando la ecuación (12), con el resultado del ítem anterior.

$$H_f = 10.665 \cdot \frac{Q^{1.852} \cdot L}{D^{4.87} \cdot C^{1.852}}$$

- e) Cálculo de la presión residual, la cual se tiene en la tubería con la ecuación (9)

$$P = \Delta z - H_f$$

- f) Se verifica que la presión residual sea positiva y mayor a la presión mínima admisible.

2. Análisis de la línea de conducción por cada tramo. Para ello se recomienda realizar la siguiente tabla:

- a) Columna 1: Distancia horizontal acumulada.
b) Columna 2: Cotas del proyecto.

- c) Columna 3: Longitud de la tubería real [m].
- d) Columna 4: Se coloca el caudal de diseño en [m^3/s].
- e) Columna 5: Cálculo de la pérdida de carga unitaria [m/km].

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

- f) Columna 6: Se procede a calcular el diámetro de la tubería con la ecuación (13).

$$D = \frac{1.6117 \cdot Q^{0.380}}{C^{0.380} \cdot S^{0.205}}$$

- g) Columna 7 y 8: Una vez que se ha calculado el diámetro exacto para el caudal, se debe seleccionar un diámetro discreto entre los que ofrece el comercio. En la columna 6 se colocan el diámetro comercial en [mm] y en la siguiente columna el valor del diámetro interno en [m].

- h) Columna 9: Se calcula la velocidad utilizando el diámetro en la columna 6.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

- i) Columna 10: Se calcula la velocidad real que circula por la tubería utilizando el diámetro de la columna 8.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

- j) Columna 11: Determinar la pérdida de en el tramo utilizando la ecuación de Hazen-Williams.

$$Hf = 10.665 \cdot \frac{Q^{1.852} \cdot L}{D^{4.87} \cdot C^{1.852}}$$

- k) Columna 12: Se calcula la altura piezométrica (L.G.H).

$$L.G.H = \text{Cotas del proyecto} - Hf$$

- l) Columna 13: La presión en cada tramo de la tubería se calcula de la siguiente manera:

$$P = \text{Cotas del proyecto} - L.G.H$$

En la Figura 16 se muestra la elaboración de la tabla para el cálculo de las presiones y los diámetros a lo largo de la línea de conducción.

DISTANCIA HORIZONTAL	NIVEL DINAMICO - COTA -	LONG. DE TUBERIA	CAUDAL	PERDIDA DE CARGA UNITARIA	DIAMETRO CALCULADO	DIAMETRO COMERCIAL	DIAMETRO ASUMIDO	VELOCIDAD CALCULADA	VELOCIDAD REAL	H _f HASEN Y WILLIAMS	ALTURA PIESOMETRA. - COTA -	PRESION
(Km + m)	(m.s.n.m.)	(m)	(m³/Seg.)	(m/Km)	(m)	(mm o pulg)	(m)	(m/Seg.)	(m/Seg.)	(m)	(m.s.n.m.)	(m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
00 Km + 0.00 m	2,500.00	0.00									2,500.000	0.000
00 Km + 3.00 m	2,498.67	3.28	0.010	405.290	0.05154	4 "	0.10226	4.793 m/Seg.	1.218 m/Seg.	0.048769715	2,499.951	1.281
00 Km + 12.90 m	2,483.67	17.97	0.010	834.609	0.04445	4 "	0.10226	6.445 m/Seg.	1.218 m/Seg.	0.267099166	2,499.684	16.014
00 Km + 29.70 m	2,486.70	17.07	0.010	-177.493	0.06105	4 "	0.10226	3.416 m/Seg.	1.218 m/Seg.	0.253702587	2,499.430	12.730
00 Km + 53.40 m	2,482.40	24.09	0.010	178.520	0.06098	4 "	0.10226	3.424 m/Seg.	1.218 m/Seg.	0.357969418	2,499.072	16.672
00 Km + 84.00 m	2,471.67	32.43	0.010	330.900	0.05373	4 "	0.10226	4.410 m/Seg.	1.218 m/Seg.	0.481911978	2,498.591	26.921
00 Km + 121.50 m	2,470.67	37.51	0.010	26.657	0.09005	4 "	0.10226	1.570 m/Seg.	1.218 m/Seg.	0.55750681	2,498.033	27.363
00 Km + 165.90 m	2,469.20	44.42	0.010	33.090	0.08614	4 "	0.10226	1.716 m/Seg.	1.218 m/Seg.	0.66021504	2,497.373	28.173
00 Km + 265.90 m	2,468.89	100.00	0.010	3.100	0.13997	4 "	0.10226	0.650 m/Seg.	1.218 m/Seg.	1.486163651	2,495.887	26.997
00 Km + 399.90 m	2,465.39	134.05	0.010	26.110	0.09043	4 "	0.10226	1.557 m/Seg.	1.218 m/Seg.	1.992128914	2,493.895	28.505
00 Km + 540.90 m	2,461.89	141.04	0.010	24.815	0.09138	4 "	0.10226	1.525 m/Seg.	1.218 m/Seg.	2.096126162	2,491.798	29.908
00 Km + 688.90 m	2,463.67	148.01	0.010	-12.026	0.10601	4 "	0.10226	1.133 m/Seg.	1.218 m/Seg.	2.199670708	2,489.599	25.929
00 Km + 843.90 m	2,460.17	155.04	0.010	22.575	0.09317	4 "	0.10226	1.467 m/Seg.	1.218 m/Seg.	2.304129787	2,487.295	27.125
01 Km + 005.90 m	2,456.67	162.04	0.010	21.600	0.09401	4 "	0.10226	1.441 m/Seg.	1.218 m/Seg.	2.408135376	2,484.886	28.216
01 Km + 174.90 m	2,453.67	169.03	0.010	17.749	0.09788	4 "	0.10226	1.329 m/Seg.	1.218 m/Seg.	2.512000193	2,482.374	28.704
01 Km + 358.90 m	2,449.89	184.04	0.010	20.539	0.09499	4 "	0.10226	1.411 m/Seg.	1.218 m/Seg.	2.73510495	2,479.639	29.749

Figura 16. Análisis de la línea de conducción por cada tramo

2.3.4.1.2 Ejemplo de cálculo

Determinar los cálculos hidráulicos de la línea de conducción con los siguientes datos:

- Caudal de diseño (Qd) = 9.5 Lts/seg.
- Longitud de tubería (L) = 1368.18 m.
- Cota captación (cota cap.) = 2500 msnm.
- Cota reservorio(R) = 2450 msnm.
- Tubería Flex de Baja densidad (C)= 140
- Presión mínima requerida: 5 m.

1. Analisis preliminar

- a) Se determina la carga en el sistema.

$$\Delta H = (Cota S_{Salida}) - (Cota L_{Llegada})$$

$$\Delta H = 2500 - 2450 = 50m$$

- b) Calculamos la pérdida de carga unitaria [m/km].

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

$$S = \frac{50}{1370.36 * 1000} = 36.68 \text{ m/km}$$

- c) Calculamos el diametro.

$$D = \frac{1.6117 \cdot Q^{0.380}}{C^{0.380} \cdot S^{0.205}}$$

$$D = \frac{1.6117 \cdot (0.0095)^{0.380}}{(140)^{0.380} \cdot (0.03668)^{0.205}}$$

$D = 0.083 \text{ m}$, este resultado se debe ajustar a la oferta local.

El diametro que se aproxima a lo calculado es una tubería de 4 pulgadas de diametro comercial y cuyo diametro interior es de 0.10226 m.

- d) Determinar la perdida carga por fricción en el tramo.

$$H_f = 10.665 \cdot \frac{Q^{1.852} \cdot L}{D^{4.87} \cdot C^{1.852}}$$

$$H_f = 10.665 \cdot \frac{(0.0095)^{1.852} \cdot (1370.36)}{(0.10226)^{4.87} \cdot (140)^{1.852}}$$

$$H_f = 18.423 \text{ m}$$

e) Cálculo de la presión residual.

$$P = \Delta z - H_f$$

$$P = 50 - 18.423 = 31.577 \text{ m}$$

f) Se verifica que la presión residual sea positiva y mayor a la presión mínima admisible.

$$\textit{Presion residual} > \textit{Presion minina}$$

$$31.577 \text{ m} > 5 \text{ m}$$

2. Análisis de la línea de conducción por cada tramo. Para ello se recomienda realizar la siguiente tabla que se ilustra en la Figura 17:

DISTANCIA HORIZONTAL	NIVEL DINAMICO - COTA -	LONG. DE TUBERIA	CAUDAL	PERDIDA DE CARGA UNITARIA	DIAMETRO CALCULADO	DIAMETRO COMERCIAL	DIAMETRO ASUMIDO	VELOCIDAD CALCULADA	VELOCIDAD REAL	H, HASEN Y WILLIAMS	ALTURA PIEOMETRA. - COTA -	PRESION
(Km + m)	(m.s.n.m.)	(m)	(m³/Seg.)	(m/Km)	(m)	(mm o pulg)	(m)	(m³/Seg.)	(m³/Seg.)	(m)	(m.s.n.m.)	(m)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
00 Km + 0.00 m	2,500.00	0.00									2,500.000	0.000
00 Km + 3.00 m	2,498.67	3.28	0.010	405.290	0.05055	4 "	0.10226	4.734 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	0.044350073	2,499.956	1.286
00 Km + 12.90 m	2,493.67	11.09	0.010	450.816	0.04946	4 "	0.10226	4.945 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	0.149882145	2,499.806	6.136
00 Km + 29.70 m	2,489.70	17.26	0.010	229.976	0.05677	4 "	0.10226	3.753 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	0.233301458	2,499.572	9.872
00 Km + 53.40 m	2,482.40	24.80	0.010	294.369	0.05397	4 "	0.10226	4.152 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	0.335149952	2,499.237	16.837
00 Km + 84.00 m	2,475.67	31.33	0.010	214.801	0.05757	4 "	0.10226	3.649 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	0.423435867	2,498.814	23.144
00 Km + 121.50 m	2,472.67	37.62	0.010	79.745	0.07054	4 "	0.10226	2.431 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	0.508423068	2,498.305	25.635
00 Km + 165.90 m	2,469.20	44.54	0.010	77.916	0.07088	4 "	0.10226	2.408 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	0.601885552	2,497.704	28.504
00 Km + 265.90 m	2,467.89	100.01	0.010	13.099	0.10215	4 "	0.10226	1.159 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	1.351592978	2,496.352	28.462
00 Km + 399.90 m	2,464.39	134.05	0.010	26.110	0.08868	4 "	0.10226	1.538 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	1.811596846	2,494.540	30.150
00 Km + 540.90 m	2,460.89	141.04	0.010	24.815	0.08961	4 "	0.10226	1.506 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	1.906169584	2,492.634	31.744
00 Km + 688.90 m	2,463.67	148.03	0.010	-18.780	0.09488	4 "	0.10226	1.344 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	2.000538821	2,490.634	26.964
00 Km + 843.90 m	2,460.17	155.04	0.010	22.575	0.09137	4 "	0.10226	1.449 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	2.095323363	2,488.538	28.368
01 Km + 005.90 m	2,456.67	162.04	0.010	21.600	0.09220	4 "	0.10226	1.423 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	2.189903686	2,486.348	29.678
01 Km + 174.90 m	2,453.67	169.03	0.010	17.749	0.09599	4 "	0.10226	1.313 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	2.284355995	2,484.064	30.394
01 Km + 358.90 m	2,450.00	184.04	0.010	19.942	0.09372	4 "	0.10226	1.377 m³/Seg.	1.157 m³/Seg.	2.48721231	2,481.577	31.577

Figura 17. Tabla ilustrativa con los cálculos de las presiones y diámetros



Figura 18. Perfil de la línea de conducción

Como se ha podido constar con los cálculos hidráulicos, la presión máxima que existe a lo largo de la línea de conducción es de 32 m.c.a; la tubería flex de 4 pulgadas tiene una presión de trabajo de 4.01 kg/cm^2 , lo que equivale a una presión de 44.01 m.c.a, por lo tanto esta tubería puede transportar sin dificultad alguna dicho caudal.

2.4 RAPIDAS

Se emplean estas estructuras cuando un canal, que destinado a conducir agua para la irrigación debe sortear una fuerte diferencia de cotas en un tramo longitudinal en plano muy corto, de manera que se está en la presencia de un tramo de canal de fuerte pendiente, en el cual la velocidad es muy alta y puede por consiguiente ocasionar daños en el canal si es que no se toman las previsiones al caso.

Bottega & Hoogedam (2012) indica que "las rápidas de gran pendiente e inclinadas son las que se ajustan de mejor manera a la pendiente natural del terreno y por tanto requieren menos movimiento de tierra a comparación una serie de caídas verticales" (pág. 129). Su desventaja más notable es que conducen el agua a gran velocidad lo que desgasta más rápidamente la solera e impide operaciones de derivación.

2.4.1 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA RAPIDA

Una rápida está compuesta por:

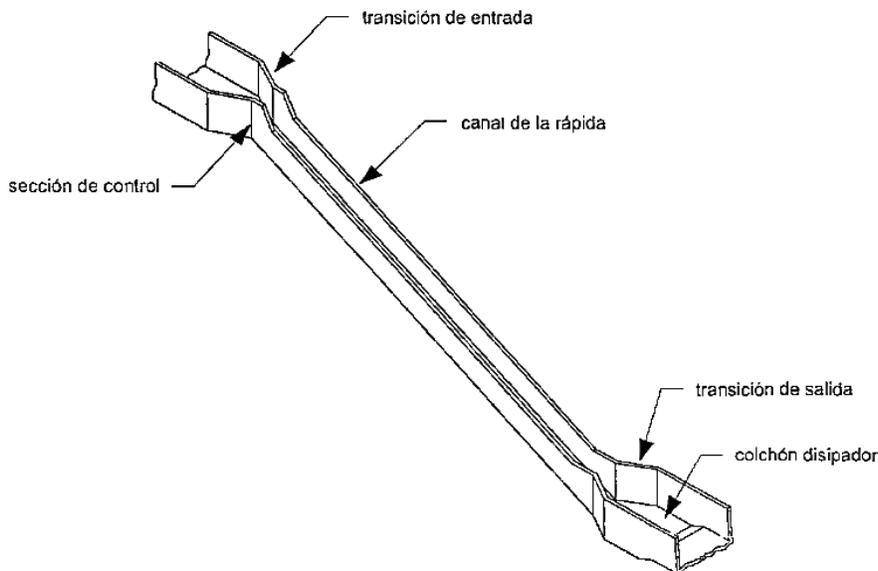


Figura 19. Elementos constitutivos de una rápida.

2.4.1.1 Transición de entrada

Es la estructura que se emplea para unir la sección del canal superior con la sección de control mediante un estrechamiento progresivo, su propósito es evitar que se formen remolinos y que se presente un flujo inestable en el canal. Su necesidad es especialmente importante en canales de tierra.

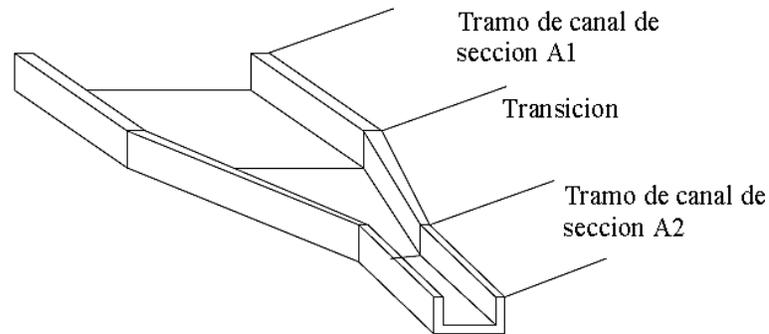


Figura 20. Transición de entrada

2.4.1.2 Sección de control

Es la zona en donde la conducción aumenta drásticamente su pendiente. En esta sección las condiciones del flujo son las del régimen crítico. Con la implementación de esta infraestructura se intenta disminuir las altas velocidades en la entrada a la rápida y lograr que el efecto del remanso sea el mínimo posible. En este tramo de cambio de pendiente se debe verificar la relación entre la energía mínima y específica en el canal más las pérdidas.

$$y_n + \frac{v_n^2}{2g} = y_c + \frac{v_c^2}{2g} + hf \quad (14)$$

Donde:

y_n = Tirante normal en el canal de entrada [m].

v_n = Velocidad normal en el canal de entrada [m/s].

y_c = Tirante crítico [m].

v_c = Velocidad crítica [m/s].

g = Aceleración de la gravedad [m/s^2].

hf = Pérdida de carga por abatimiento de la superficie del agua [m].

Existen dos alternativas que son utilizadas para lograr las condiciones adecuadas de flujo en esta zona son:

1. Realizar en el canal un estrechamiento progresivo, haciendo que la pérdida de carga por abatimiento de la superficie del agua sea igual a cero.
2. También se puede sobre elevar el fondo del canal con un peldaño de altura igual a la pérdida de carga por abatimiento de la superficie del agua.

Bottega & Hoogedam (2012) recomienda “el estrechamiento progresivo de la sección del canal en lugar de una sobreelevación, para así obtener una rápida de sección más reducida que la sección del canal” (pág. 131). La ventaja de la conducción a régimen supercrítico puede traducirse en una economía del volumen de obras, más aún porque la rápida exige un incremento en la calidad del revestimiento.

2.4.1.3 Canal de la rápida

Es el canal que une los tramos que van desde la sección de control hasta llegar a la zona en donde se localiza el colchón disipador. El régimen de flujo que predomina en esta zona de la rápida es el de tipo supercrítico y la extensión del agua sigue una curva que se acerca asintóticamente al tirante normal. Tratándose de esta situación Sviatoslav Krochin (1982) recomienda seguir "una alineación recta en planta y utilizar canales prismáticos de secciones rectangulares, dado que el flujo a altas velocidades es muy sensible a todo cambio de sección y de dirección" (pág. 253).

El flujo es especialmente inestable cuando el régimen se acerca al crítico, es decir cuando el número de Froude se encuentra entre 1 y 1.5.

Cuando no es viable seguir una alineación recta en la alineación horizontal se pueden adoptar las siguientes soluciones prácticas:

- Construir una cámara de disipación en donde se ocasiona el cambio de dirección, desde este punto se iniciara la otra trayectoria de la rápida.
- Se puede sustituir el tramo del canal por una sección cerrada que trabajará a presión, es decir se colocaran tuberías en este trecho.

Cuando en la alineación vertical del canal de la rápida se producen cambios de pendiente, de una más suave a otra más pronunciada, la unión entre los dos tramos debe realizarse con una curva vertical de enlace para evitar la separación entre el flujo y el cauce, lo que podría hacer saltar el agua fuera del canal y ocasionar erosiones. Dicha curva debe construirse de tal manera que siga la trayectoria parabólica del agua. (Sviatoslav Krochin, 1982, pág. 256).

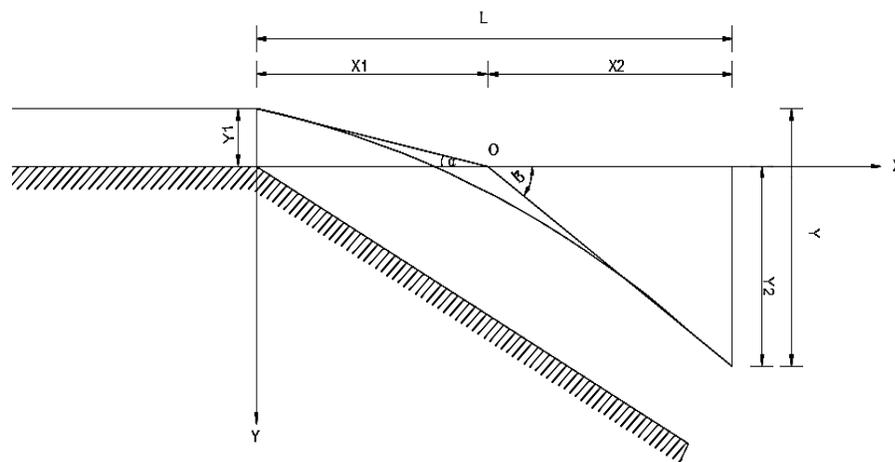


Figura 21. Curva vertical de enlace en las rápidas

La ecuación de la curva vertical de enlace en las rápidas viene dada por la siguiente expresión:

$$y = L \cdot \tan \alpha + \frac{g \cdot L^2}{2 \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (15)$$

Donde:

y = Altura de la solera respecto de nivel del punto de partida de la curva vertical [m].

L = Longitud horizontal de la curva vertical [m].

Para determinar el ancho de la solera en la rápida se puede utilizar la expresión empírica propuesta por Dadenkov:

$$b = 0.765 \cdot Q^{\frac{2}{5}} \quad (16)$$

Para determinar el bordo libre de una rápida debe considerarse dos aspectos muy importantes los cuales son:

- El flujo que circula por el canal de la rápida incorpora burbujas de aire en directa relación a su velocidad. A medida que el aire es agregado dentro del agua, la mezcla aumenta de volumen. Para suplir este aumento de volumen se recomienda multiplicar el valor de la rugosidad de Manning n por un coeficiente a $n_a = a \cdot n$, que está en función de la pendiente según la siguiente tabla propuesta por Nichiporovichl (Sviatoslav Krochin, 1982, pág. 260).

Tabla 6
Coeficientes propuestos por Nichiporovichl

Pendiente	Coeficiente (a)
10%-20%	1.33
20%-40%	2.00
>40%	3.33

Nota. Fuente: Sviatoslav Krochin, (1982). Diseño Hidráulico (pag.260). Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- El flujo que transita por la rápida es de tipo supercrítico con un tirante pequeño. Ante la eventual aparición de algún obstáculo se forma un resalto hidráulico con un tirante mucho mayor.

2.4.1.4 Colchón disipador

Esta estructura se encuentra localizada en el extremo final del canal de la rápida. Tiene como propósito absorber el exceso de energía cinética generada en la rápida mediante la reducción de la velocidad del agua en una poza de disipación. En el colchón, el régimen del flujo pasa del estado supercrítico a subcrítico mediante un resalto hidráulico.

En la salida del colchón “se debe construir una rampa que tenga un talud de 2:1 o más tendida lo cual permitirá la auto limpieza del colchón” (Bottega & Hoogedam, 2012, pág. 132).

2.4.1.5 Transición de salida

Este elemento hidráulico de la rápida tiene como propósito unir el colchón disipador con el canal aguas abajo.

2.4.2 DISEÑO HIDRAULICO

Los datos que se requieren para el cálculo de una rápida son los siguientes:

- El caudal Q [m^3/s].
- El coeficiente de rugosidad de Manning del canal n .
- La pendiente del canal de entrada S_{canal} [m/m].
- El ancho b del canal [m].
- El desnivel Δz [m], la longitud L [m] y la pendiente de la rápida S_o [m/m].

2.4.2.1 Procedimiento

Diseño del canal, aguas arriba y aguas abajo de la rápida. Para el diseño de los canales se sigue el lineamiento descrito en la sección 2.2.5.

El procedimiento que se sigue para determinar las dimensiones geométricas de una rápida es el siguiente:

1. Cálculo del ancho de la solera en la rápida y el tirante en la sección de control.

En la sección de control se presentan las condiciones críticas tal y como se describe en la sección 2.4.1.2; aquí el flujo pasa de subcrítico a crítico y se cumple que la energía específica en el canal es igual a la energía específica mínima, $E_n = E_{min}$.

$$y_n + \frac{v_n^2}{2g} = y_c + \frac{v_c^2}{2g}$$

Calculamos el valor del tirante normal y_n , la velocidad v_n y la energía específica en el canal de entrada.

$$E_n = y_n + \frac{v_n^2}{2g}$$

La altura crítica en la sección de control se considera como:

$$y_c = \frac{2}{3} \cdot E_{min} \quad (17)$$

La altura crítica para una sección de tipo rectangular se considera como:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}} \quad (18)$$

La velocidad crítica viene dada por:

$$v_c = \sqrt{y_c \cdot g} \quad (19)$$

Igualando las ecuaciones (17) = (18) y sabiendo que la $E_n = E_{min}$ obtenemos el ancho de la sección de control y del canal de la rápida.

$$b = \sqrt{\frac{27 \cdot Q^2}{8 \cdot E_n^3 \cdot g}} \quad (20)$$

Donde:

Q= Caudal en $[m^3/s]$.

E_{min} = Energía específica mínima $[m]$.

g= Gravedad $[m/s^2]$.

Otra alternativa para determinar el ancho de la solera en la rápida y en la sección de control es utilizar la ecuación empírica propuesta por Dadenkov ver la expresión (16).

2. Diseño de la transición de entrada.

Para el caso de una transición recta la ecuación utilizada es:

$$L = \frac{T1 - T2}{2 \cdot \tan 22.5^\circ} \quad (21)$$

Donde:

T1= Ancho del canal de ingreso.

T2=b= Ancho de la solera en la rápida.

3. Se establecen los tirantes a lo largo de la rápida, mediante las ecuaciones del flujo no uniforme. Tratándose de una curva de remanso tipo S2, Villón Bejar (1995) “recomienda utilizar el método numérico de tramos fijos con la asistencia de una planilla de cálculo, con tantas filas como tramos en que se desee dividir la longitud de la rápida” (pág. 365). El método es más exacto cuanto mayor sea el número de tramos en que se divida la longitud de la rápida, dando valores al tirante desconocido y_2 en cada sección hasta que se satisfaga con la siguiente igualdad:

$$S_0 \cdot \Delta x + E1 = E2 + \overline{SE} \cdot \Delta x \quad (22)$$

Donde:

S_0 = Pendiente del fondo del canal de la rápida [m/m].

Δx = Distancia [m] específica del tramo desde una sección 1 de características conocidas hasta la sección 2 donde el tirante es conocido. Δx es positivo si el cálculo se efectúa aguas abajo.

E = Energía del flujo en una determinada sección [m].

\overline{SE} = Promedio de energía entre dos secciones continuas [m].

Desarrollando la ecuación de la energía y dejándola en función del caudal se obtiene:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} = y + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = y + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot b \cdot y^2} \quad (23)$$

Además se tiene que:

$$\overline{SE} = \frac{S_{E1} + S_{E2}}{2} \quad (24)$$

$$S_E = \left(\frac{v \cdot n}{R^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3}} \right)^2 = Q^2 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{(P)^2}{(A)^5} \right)^{2/3} \quad (25)$$

Para simplificar el cálculo y_2 , resulta conveniente expresar la ecuación (22) en f (y_2). Reemplazando las expresiones (24) y (23) en la ecuación (22), se obtiene que:

$$S_0 \cdot \Delta x + y_1 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_2^2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot S_{E1} + \frac{\Delta x}{2} \cdot S_{E2} \quad (26)$$

$$S_0 \cdot \Delta x + y_1 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_1^2} - \frac{\Delta x}{2} \cdot S_{E1} = y_2 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_2^2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot S_{E2} \quad (27)$$

En la ecuación (27) si S_0 , Δx , y_1 , Q y n son datos, el primer miembro es un valor constante C , es decir:

$$C = S_0 \cdot \Delta x + y_1 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_1^2} - \frac{\Delta x}{2} \cdot Q^2 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{(P_1)^2}{(A_1)^5} \right)^{2/3} \quad (28)$$

Y el segundo miembro es una función de y_2 , con lo cual se tiene:

$$f(y_2) = y_2 + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A_2^2} + \frac{\Delta x}{2} \cdot Q^2 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{(P_1)^2}{(A_1)^5} \right)^{2/3} = C \quad (29)$$

La ecuación (29), se puede resolver por tanteos dando valores a y_2 y calculando $f(y_2)$, la solución adecuada para y_2 será aquella que hace que $f(y_2) = C$.

4. El bordo libre que necesita cada tramo se puede calcular con la siguiente expresión empírica en función del tirante y la velocidad y en el tramo dado:

$$Bl = 0.61 + 0.0371 \cdot v \cdot \sqrt{y} \quad (30)$$

La expresión anterior garantiza un bordo libre mínimo de 0.61 m, “para rápidas cortas es recomendable mantener constante la altura de las paredes de la rápida tomando el mayor valor de $h = y + Bl$ ” (Villón Bejar, 2003, pág. 48).

5. Cuando el tirante conjugado a la salida de la rápida, luego de que se produzca el resalto hidráulico, es superior al tirante normal del canal de salida, es recomendable elevar unos centímetros la altura de la solera. La profundidad que tendrá el colchón disipador , se la determina utilizando la siguiente expresión:

$$e = 1.15 \cdot y_2 - y_n \quad (31)$$

Donde:

y_n = Tirante normal del canal de salida [m].

y_2 = Altura del tirante conjugado mayor del resalto hidráulico [m].

La altura del tirante conjugado mayor del resalto hidráulico se calcula con la siguiente expresión:

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2 \cdot Q^2}{g \cdot y_1 \cdot B^2} + \frac{y_1^2}{4}} \quad (32)$$

Donde:

y_1 = Altura del tirante de agua en la rápida [m].

Q = Caudal [m^3/s].

B = Ancho del canal de salida.

g = Gravedad [m/s^2].

6. Se determina la longitud del colchón disipador. Para este cálculo se considera que la disipación del exceso de energía cinética se producirá exclusivamente por la formación de un resalto hidráulico, por lo que se utiliza la ecuación propuesta por Sieñchin:

$$L_p = K \cdot (y_2 - y_1) \quad (33)$$

Donde:

L_p = Longitud del colchón disipador [m].

K = Coeficiente de sección, para secciones rectangulares se asume un valor de 5.

7. Determinar la longitud que tendrá la transición de la salida, que conviene ubicarla entre la salida de la rápida y la entrada al canal inferior. El ensanchamiento de la sección disminuye la velocidad del flujo que sale de la rápida y colabora con la disminución del

tirante conjugado; se aplica el mismo procedimiento descrito en el ítem 3, a fin de calcular la longitud para la transición de salida.

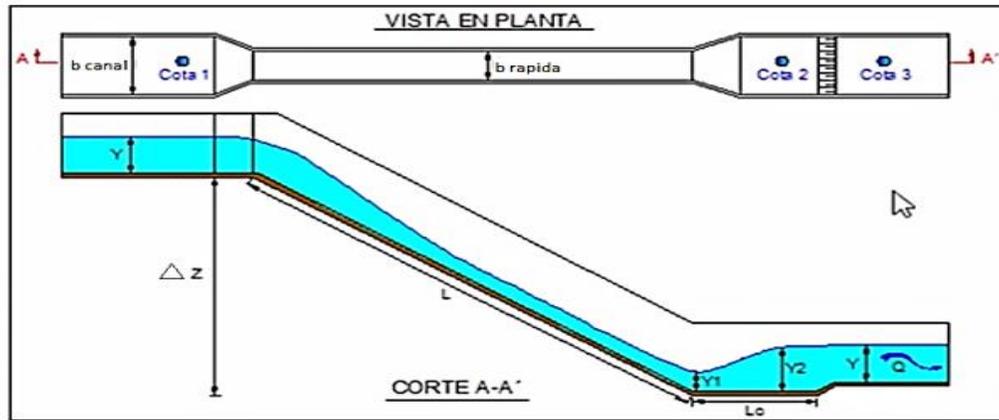


Figura 22. Geometría de una rápida de gran pendiente

2.4.2.2 Ejemplo de cálculo

Un canal rectangular revestido con hormigón conduce un caudal de 200 Lts/seg con una pendiente de 0.003 m/m y un coeficiente $n = 0.013$. Además tiene 0.45 m de base y la altura de su tirante de agua es de 0.45 m; el canal debe enfrentar una ladera con una rápida de 100 m de longitud hasta el tramo inferior del canal de salida con iguales características al de la entrada, pero ubicado 20 m más abajo.

Diseño hidráulico de la rápida

El procedimiento que se sigue para determinar las dimensiones geométricas de una rápida es el siguiente:

1. Cálculo del ancho de la solera en la rápida y el tirante en la sección de control.

Calculamos el valor del tirante normal y_n , la velocidad v_n y la energía específica en el canal de entrada.

$$E_n = y_n + \frac{v_n^2}{2g}$$

$$v_n = \frac{Q}{A} = \frac{0.2}{0.45 \cdot 0.45}$$

$$v_n = \frac{Q}{A} = \frac{0.2}{0.45 \cdot 0.45}$$

$$v_n = 0.987 \text{ m/s}$$

$$E_n = 0.45 + \frac{0.987^2}{2 \cdot 9.81}$$

$$E_n = 0.472 \text{ m}$$

Luego procedemos a calcular el ancho de la solera en la rápida utilizando la ecuación (20).

$$b = \sqrt{\frac{27 \cdot Q^2}{8 \cdot E_n^3 \cdot g}} = \sqrt{\frac{27 \cdot (0.2)^2}{8 \cdot (0.472)^3 \cdot (9.81)}}$$

$$b = 0.361 \text{ m}$$

El tirante crítico que se presenta en la sección de control es:

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \cdot g}} = \sqrt[3]{\frac{(0.2)^2}{(0.361)^2 \cdot (9.81)}}$$

$$y_c = 0.315 \text{ m}$$

La velocidad crítica alcanza es:

$$v_c = \sqrt{y_c \cdot g} = \sqrt{(0.315) \cdot (9.81)}$$

$$v_c = 1.758 \text{ m/s}$$

2. Diseño de la transición de entrada.

Para el caso de una transición recta la ecuación utilizada es:

$$L = \frac{T_1 - T_2}{2 \cdot \tan 22.5^\circ} = L = \frac{0.45 - 0.361}{2 \cdot \tan 22.5^\circ}$$

$$L = 0.11 \text{ m} \approx 0.15 \text{ m}$$

3. Determinación de los tirantes de agua. Se empleara el método de los tramos fijos para poder determinar los tirantes de agua a lo largo del canal de la rápida y con la ayuda de una plantilla previamente programada en Microsoft Excel.

METODO DE TRAMOS FIJOS

DATOS:

So =	0.2
Z =	0
Q =	0.2 m³/s
n =	0.013
b =	0.361 m

Nuero de tramos=	10
Longitud=	100 m
Tolerancia=	0.1
y1=	0.315 m

TRAMO	X	ΔX	SoΔX	Y	A	P	R	R ^{2/3}	V	V ^{2/(2g)}	E	SoΔX+E	SE	SE	SEΔX	E+SEΔX	C	f(y2)	ERROR
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0.00	10.000	2.0000	0.3149	0.1138	0.8912	0.1148	0.2362	1.7576	0.1575	0.47237	2.47237	0.009357	-	-	-	-	-	-
1	10.00	10.000	2.0000	0.1940	0.0701	0.7493	0.0935	0.2061	2.8531	0.4149	0.60890	2.60890	0.092396	0.0208765	0.208765	0.81767	2.4469	0.7709	NO CUMPLE
2	20.00	10.000	2.0000	0.1470	0.0531	0.6553	0.0811	0.1873	3.7654	0.7226	0.86363	2.86363	0.068310	0.0503531	0.503531	1.37316	2.5281	1.2112	NO CUMPLE
3	30.00	10.000	2.0000	0.1200	0.0434	0.6013	0.0721	0.1732	4.6126	1.0844	1.20440	3.20440	0.19806	0.0940581	0.940581	2.14438	2.6054	1.8034	NO CUMPLE
4	40.00	10.000	2.0000	0.1100	0.0397	0.5813	0.0684	0.1672	5.0313	1.2905	1.40052	3.40052	0.153057	0.1364313	1.364313	2.76484	2.6352	2.1658	NO CUMPLE
5	50.00	10.000	2.0000	0.1008	0.0364	0.5630	0.0647	0.1612	5.4905	1.5365	1.63727	3.63727	0.136116	0.1745865	1.745865	3.38314	2.6567	2.6179	NO CUMPLE
6	60.00	10.000	2.0000	0.1008	0.0364	0.5630	0.0647	0.1612	5.4905	1.5365	1.63727	3.63727	0.136116	0.136116	1.36116	3.53843	2.6567	2.6179	CUMPLE
7	70.00	10.000	2.0000	0.1008	0.0364	0.5630	0.0647	0.1612	5.4905	1.5365	1.63727	3.63727	0.136116	0.136116	1.36116	3.53843	2.6567	2.6179	CUMPLE
8	80.00	10.000	2.0000	0.1008	0.0364	0.5630	0.0647	0.1612	5.4905	1.5365	1.63727	3.63727	0.136116	0.136116	1.36116	3.53843	2.6567	2.6179	CUMPLE
9	90.00	10.000	2.0000	0.1008	0.0364	0.5630	0.0647	0.1612	5.4905	1.5365	1.63727	3.63727	0.136116	0.136116	1.36116	3.53843	2.6567	2.6179	CUMPLE
10	100.00	10.000	2.0000	0.1008	0.0364	0.5630	0.0647	0.1612	5.4905	1.5365	1.63727	3.63727	0.136116	0.136116	1.36116	3.53843	2.6567	2.6179	CUMPLE

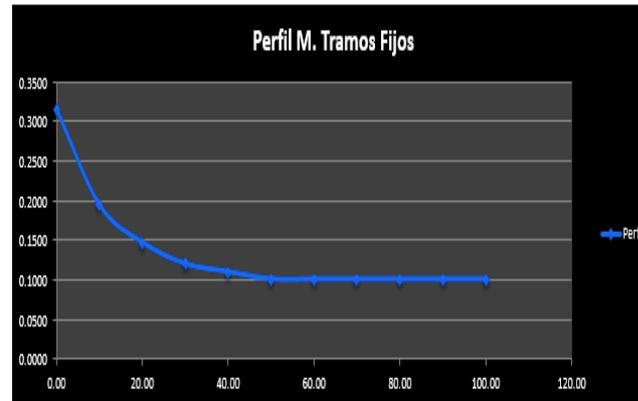


Figura 23. Método de los tramos fijos-plantilla

4. Cálculo del bordo libre.

$$Bl = 0.61 + 0.0371 \cdot v \cdot \sqrt{y} = 0.61 + 0.0371 \cdot (1.7576) \cdot \sqrt{0.315}$$

$$Bl = 0.659 \text{ m}$$

La altura del canal será:

$$h = y + Bl = 0.315 + 0.659$$

$$h = 0.975 \text{ m}$$

Igual procedimiento se sigue para determinar las demás alturas correspondientes a cada tirante de agua en el canal de la rápida.

y	Bl	h(m)
0.315	0.659	0.974
0.194	0.673	0.867
0.147	0.682	0.829
0.120	0.690	0.810
0.110	0.693	0.803
0.101	0.697	0.798
0.101	0.697	0.798
0.101	0.697	0.798
0.101	0.697	0.798
0.101	0.697	0.798
0.101	0.697	0.798
0.101	0.697	0.798
h prom		0.824

Figura 24. Plantilla para el cálculo de la altura del canal de la rápida

La altura que se asume para el canal será un promedio entre todas las alturas calculadas.

$$h \text{ promedio} = 0.824 \text{ m} \approx 0.85 \text{ m}$$

Diseño de la transición de salida.

Para el caso de una transición recta la ecuación utilizada es:

$$L = \frac{T1 - T2}{2 \cdot \tan 22.5^\circ} = L = \frac{0.45 - 0.361}{2 \cdot \tan 22.5^\circ}$$

$$L = 0.11 \text{ m} \approx 0.15 \text{ m}$$

5. Cálculo de la profundidad del colchón dissipador.

Se procede a determinar los tirantes conjugados.

$$y_1 = 0.101 \text{ m}$$

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2 \cdot Q^2}{g \cdot y_1 \cdot B^2} + \frac{y_1^2}{4}}$$

$$y_2 = -\frac{0.101}{2} + \sqrt{\frac{2 \cdot (0.2)^2}{9.81 \cdot (0.101) \cdot (0.45)^2} + \frac{(0.101)^2}{4}}$$

$$y_2 = 0.584 \text{ m}$$

Con estos resultados se determina la profundidad que tendrá el colchón disipador.

$$e = 1.15 \cdot y_2 - y_n = 1.15 \cdot (0.584) - 0.45$$

$$e = 0.23 \text{ m} \approx 0.25 \text{ m}$$

6. Cálculo de la longitud del colchón disipador.

$$L_p = K \cdot (y_2 - y_1) = 5 \cdot (0.584 - 0.101)$$

$$L_p = 2.5 \text{ m}$$

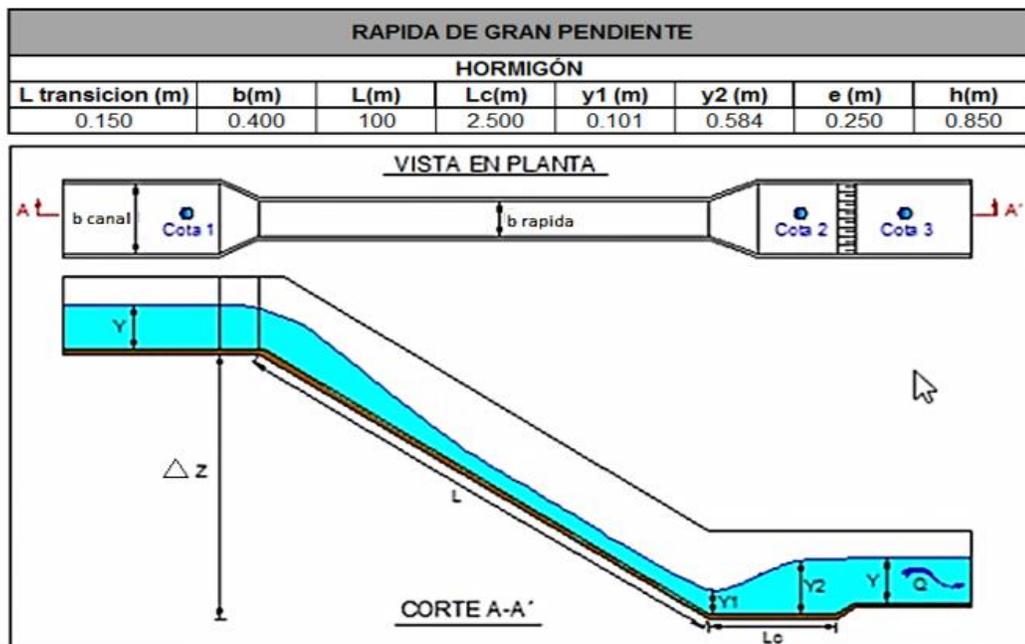


Figura 25. Dimensiones de una rápida.

CAPITULO III

ESTRUCTURAS DE DISTRIBUCION Y MEDICION DE CAUDALES

3.1 GENERALIDADES

Las estructuras de distribución se utilizan para manejar, controlar y repartir el agua eficientemente desde el canal principal hasta los sitios de entrega en las parcelas.

Un diseño adecuado de una estructura de distribución “será el que se someta a las reglas de reparto y derechos comunales e individuales, definidos como producto de un proceso de negociaciones socio-organizativas” (Alvear, Olazával, & Noordholland de Jong, 1999, pág. 96).

Para evitar inconvenientes en el reparto equitativo de los caudales entre los usuarios de un sistema de riego es indispensable contar con medidores de caudal los cuales permiten:

- Determinar la cantidad de agua con la que se abastece al sistema de riego.
- Facilitar un control social sobre la distribución y los derechos de agua.
- Descubrir las anomalías en la distribución del agua.
- Indagar y evaluar el origen de las pérdidas.

Estas infraestructuras hidráulicas deben ser ubicadas en sitios estratégicos y de fácil acceso en los lugares que permitan controlar el reparto del agua; estas pueden ser colocadas al inicio de los canales laterales, en partidores, al ingreso de los módulos de riego y al final de las bocatomas.

3.2 REPARTIDORES DE CAUDAL

Bosch (199) define a los repartidores de caudal como estructuras que "dividen proporcionalmente el caudal, independientemente del volumen que llegue a la infraestructura hidráulica; estas estructuras pueden dividir en dos o más caudales de un mismo orden, son estructuras que se adecuan a sistemas deficitarios"(pág. 15). Funcionan dividiendo el fondo, sea del canal o de los vertederos, en anchos equivalentes a los caudales a repartirse.

En canales terciarios, divisiones parcelarias, o distribución a nivel de acequias; se realiza la distribución de caudal generalmente en forma porcentual por medio de cajones o tanques repartidores.

Alvear, Olazával, & Noordholland de Jong (1999) señalan que "existen dos tipos repartidores que son: Fijos y móviles, los fijos dividen el caudal en proporciones constantes, los móviles permite repartir el caudal en caudales variables, mediante la ubicación de compuertas móviles que giran en un pivote" (pág. 99).

Algunas ventajas que presentan los repartidores de caudal son:

- Garantizar una distribución proporcional a los derechos de los usuarios.
- Repartir automáticamente la escasez del agua, cuando hay déficit.
- Ofrecen mucha transparencia a los usuarios.

Algunas desventajas que presentan los repartidores de caudal son:

- Son estructuras rígidas, es decir no se puede cambiar las proporciones, para poderlo hacer se requiere romper la estructura.
- Necesitan una pérdida de nivel para no ser susceptibles a alteraciones en el flujo agua arriba.

- Los partidores al interior de un canal no necesitan pérdida de nivel; pero son susceptibles a cualquier tipo de alteraciones en el flujo de un canal.

3.2.1 ESTRUCTURAS DE APROXIMACION

Una estructura de aproximación hidráulica es aquella que ayuda a la medición de parámetros hidráulicos promedios, mediante una relación entre las cantidades teóricas y las reales. Los vertederos forman parte de las estructuras de aproximación.

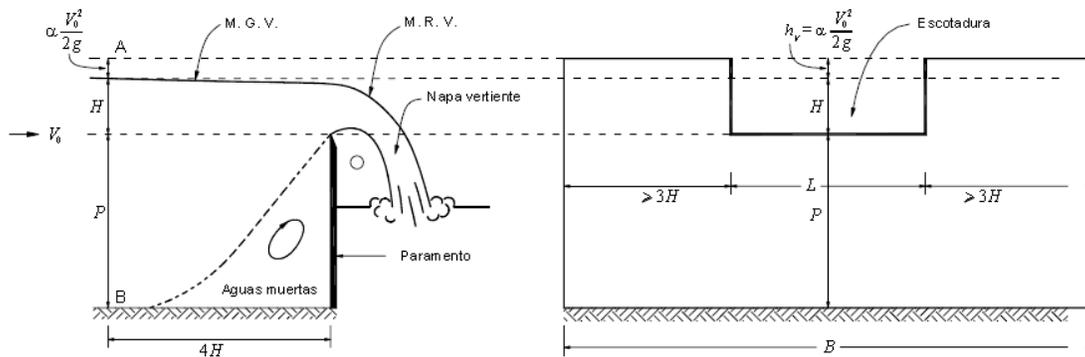
Rocha Felices (1978), considera que un vertedero es "una abertura de contorno abierto destinada sobre la pared de un depósito, o una barrera colocada sobre un río o canal que hace que el líquido escurra manteniendo la superficie libre"(pág. 457). El líquido que escurra, llamada lámina de agua, es la vena líquida que transpone el vertedero, llamada también por autores como NAPA que a su vez puede ser libre o deprimida.

Un vertedero tiene dos finalidades:

- Medir caudales.
- Permitir el rebose del líquido.

Estas dos funciones se encuentran siempre presentes en los vertederos ya que sirven para medir caudales relativamente pequeños y el rebose de un líquido que se encuentra en un depósito al llegar a una cierta altura a la que se denomina aliviadero; Cadena Navarro (2012) señala que "dentro de este último se puede decir que también permite la evacuación sea libre o controlada del volumen de agua excedente en las obras civiles hidráulicas, que en dicho caso se nombra como vertedero de excesos" (pág. 151).

En la Figura 26 se muestran las partes constitutivas de un vertedero de manera general.



P : es el umbral
 α : es el coeficiente de Coriolis
 H : es la carga
 L : es la longitud del vertedero
 B : es el ancho del canal de aproximación
 V_0 : es la velocidad de aproximación

Figura 26. Descarga sobre un vertedero rectangular en pared delgada. Fuente: Rocha Felices Arturo.

La ecuación general para determinar el gasto en un vertedero rectangular es:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot \mu \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (34)$$

Para simplificar la ecuación, se tiene que $M = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot \mu$. Reemplazando el valor de M en la expresión anterior se obtiene:

$$Q = M \cdot L \cdot H^{3/2} \quad (35)$$

Donde:

Q= Caudal o gasto [m^3/s].

M= Coeficiente de gasto.

L= Ancho total de la abertura del vertedero en metros [m].

H= Carga hidráulica sobre la coronación del aliviadero en metros [m].

El valor de M debe tomarse si el vertedero es libre o sumergido, y de la forma geométrica del vertedero.

Los vertederos pueden clasificarse de varias maneras:

1. Por el tipo de cresta
 - Vertederos de pared delgada.
 - Vertederos de pared gruesa
2. Por los niveles aguas abajo o Tipo de descarga
 - Vertedero libre o de caída libre.
 - Vertedero sumergido o ahogado (Total o parcial).
3. Por su forma
 - Circulares.
 - Parabólicos.
 - Trapezoidales.
 - Rectangulares.
 - Triangulares.
4. Por las condiciones laterales de descarga
 - Vertederos con contracciones laterales.
 - Vertederos sin contracciones laterales.
5. Por la inclinación de su paramento respecto a la corriente
 - Vertedero con paramento inclinado.
 - Vertedero entrante.

3.2.1.1 Velocidad de aproximación

Es la velocidad de llegada o inicial, que corresponde a la velocidad media entre la línea de energía y el fondo del canal de aproximación o de entrada, y viene dada por la siguiente expresión:

$$V_o = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B(P + H)} \quad (36)$$

Donde:

B= Ancho del canal de aproximación

P= El umbral, si P fuese mucho mayor que H la V_0 tendería a cero.

La velocidad inicial da lugar a la energía cinética, cuya expresión es:

$$hv = \alpha \cdot \frac{V_0^2}{2g} \quad (37)$$

Donde:

α = Coeficiente de Coriolis.

3.2.1.2 Criterios de diseño general para vertederos

Para el diseño de vertederos se ha tomado en cuenta algunas recomendaciones descritas por los autores Francis y Arturo Rocha los cuales se presenta a continuación.

Tabla 7.
Criterios de diseño de vertederos.

CRITERIOS DE DISEÑO	AUTORES	
	ROCHA	FRANCIS
Carga hidráulica H	--	0.18-0.50m
Carga hidráulica máxima Hmax.	--	0.50m
Altura del paramento P	$\geq 3H$	0.60-1-50m
Contracciones	3H	--
Coeficiente de descarga libre Cd	0.63	0.62
Espesor de la pared gruesa	--	2/3H-15H
Coeficiente de Francis (M) (F. libre)	--	1.84
Correcta aireación lámina de agua	--	L/H>3

Nota. Fuente: Tenelema Magallanes (2015). Diseño y simulación en un modelo físico de una estructura derivadora de caudal en forma porcentual (pág.78). Universidad Central del Ecuador.

Ademas, Sviatoslav Krochin (1982) recomienda que “el fondo del canal principal, a continuación del medidor debe estar por lo menos 15 cm más bajo que aguas arriba del mismo” (pág. 292).

3.2.2 DISEÑO HIDRAULICO DE UN TANQUE REPARTIDOR DE CAUDAL.

El diseño de un tanque repartidor se lo realiza utilizando vertederos de pared delgada, estos pueden ser diseñados con contracciones laterales o sin contracciones laterales.

Bosch (1993) recomienda que “el tanque repartidor ya sea este de geometría rectangular o cuadrada, deberá tener un ancho mínimo de 0,60 m para mantenimiento” (pág. 77). El caso más sencillo de una caja repartidora de caudal, es aquel que consta de un vertedero frontal y uno lateral que distribuye agua que transporta un canal primario hacia otro secundario o alterno.

Los parámetros que se requieren para el diseño son los siguientes:

- El caudal Q en el canal principal en $[m^3/s]$.
- Los caudales Q_1, Q_2, \dots, Q_n a derivarse en $[m^3/s]$.
- El valor del coeficiente de gasto $M= 1.84$.
- La carga hidráulica H sobre la coronación del aliviadero en $[m]$.

3.2.2.1 Procedimiento

Se definen los caudales a repartirse previo a una socialización con los usuarios de un sistema de riego o de acuerdo a la demanda de riego para los cultivos.

El procedimiento que se sigue para determinar las dimensiones geométricas de un tanque repartidor de caudal es el siguiente:

1. Cálculo de las longitudes de los vertederos.

La ecuación general para vertederos con contracciones es la siguiente:

$$Q = M \cdot \left(L - \frac{n \cdot H}{10} \right) \cdot H^{3/2} \quad (38)$$

Donde:

Q= Caudal a derivarse [m^3/s].

M= Coeficiente de descarga que depende del tipo de vertedero

n= Número de contracciones.

$L - \frac{n \cdot H}{10}$ = Longitud efectiva [m].

De la ecuación (38) se procede a despejar la longitud L del vertedero, dando como resultado la siguiente expresión:

$$L = \frac{Q}{M \cdot H^{3/2}} + \frac{n \cdot H}{10} \quad (39)$$

2. En el vertedero las contracciones deben de tener una extensión de 3H, ver la Tabla 7, estas dimensiones se suman a la longitud del vertedero L. Se asume un espesor de 10 cm para las paredes del vertedero.

3. Condición de una buena aireación en los vertederos.

a) Calculo del umbral P.

La altura del umbral no debe ser inferior a 0.30m ni a 3 veces la carga sobre el vertedero. $P \geq 3H$.

b) Correcta aireación en la lámina de agua.

Para tener una correcta aireación de la lámina de agua se recomienda que $L/H > 3$. De no cumplir con la condición se debe aumentar o disminuir según convenga la carga de agua sobre el vertedero que no satisface la condición.

4. Calculo de la velocidad de aproximación V_o .

La velocidad de aproximación se calcula con la ecuación (36). Para este caso, el valor de B será la longitud total interna del tanque

repartidor paralelo a cada vertedor, es decir la longitud del vertedero más las contracciones.

5. Cálculo de la energía cinética h_v .

Una vez obtenida la velocidad de aproximación se procede a determinar la energía cinética en el vertedero, para ello se utiliza la ecuación (37), aquí el coeficiente de Coriolis será igual a 1.

6. Determinación de los caudales de salida en los vertederos.

Como penúltimo paso se determinan los caudales de salida sobre los vertederos considerando en un primer caso las contracciones utilizar la ecuación (38) y las velocidades de aproximación así como la energía cinética sobre el vertedero, para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$Q = 1.84 \cdot \left(L - \frac{n \cdot H}{10} \right) \cdot [(H + h_v)^{\frac{3}{2}} - (h_v)^{\frac{3}{2}}] \quad (40)$$

Donde:

Q= Caudal en $[m^3/s]$.

n= Número de contracciones.

L= Longitud del vertedero $[m]$.

h_v = Energía cinética $[m]$, considerando el coeficiente de Coriolis 1.

7. Determinación de las dimensiones de la caja repartidora de caudales.

Finalmente con los datos obtenidos se establecen las dimensiones del tanque repartidor, siendo:

a= Ancho del tanque repartidor en $[m]$.

b= Largo del tanque repartidor en $[m]$.

h= Altura total del tanque $[m]$.

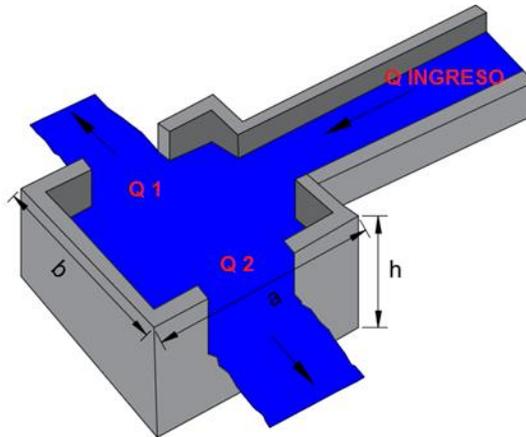


Figura 27. Dimensiones del Tanque repartidor de caudales.

3.2.2.2 Ejemplo de cálculo

Se desea dimensionar un tanque repartidor de caudal que divida un caudal máximo de llegada de 160 Lts/seg en caudales iguales de 80 Lts/seg.

Diseño hidráulico

Se asume una carga $H = 0.24$ m, para el vertedero de ingreso y una carga de 0.18 m para los dos vertederos restantes. Además $n = 2$, el espesor del tanque será de 10 cm y tendrá un borde libre de 10 cm.

1. Cálculo de las longitudes de los vertederos.

Vertedero de ingreso

$$L = \frac{Q}{M \cdot H^{3/2}} + \frac{n \cdot H}{10} = \frac{0.16}{1.84 \cdot (0.25)^{3/2}} + \frac{2 \cdot (0.25)}{10}$$

$$L = \frac{Q}{M \cdot H^{3/2}} + \frac{n \cdot H}{10} = \frac{0.16}{1.84 \cdot (0.25)^{3/2}} + \frac{2 \cdot (0.25)}{10}$$

$$L \approx 0.80 \text{ m}$$

Vertedero 1 y 2

$$L = \frac{Q}{M \cdot H^{3/2}} + \frac{n \cdot H}{10} = \frac{0.08}{1.84 \cdot (0.18)^{3/2}} + \frac{2 \cdot (0.18)}{10}$$

$$L1 = L2 \approx 0.60 \text{ m}$$

2. Determinación de las contracciones en los vertederos

Vertedero de ingreso

$$3H = 3 \cdot (0.24)$$

$$3H \approx 0.75 \text{ m}$$

Vertedero 1 y 2

$$3H = 3 \cdot (0.18)$$

$$3H \approx 0.55 \text{ m}$$

Con estos datos se puede calcular el largo y el ancho que tendrá el tanque.

Medidas de tanque

$$a = L1 + 2 \cdot (3H) + 2 \cdot e = 0.60 + 2 \cdot (0.55) + 2 \cdot (0.10)$$

$$a = 1.90 \text{ m}$$

$$b = L + 2 \cdot (3H) + 2 \cdot e = 0.80 + 2 \cdot (0.75) + 2 \cdot (0.10)$$

$$b = 2.45 \text{ m}$$

3. Condición de una buena aireación en los vertederos.

a) Calculo del umbral P.

Vertedero de ingreso

$$P = 3H = 3 \cdot (0.24)$$

$$P \approx 0.75 \text{ m}$$

Vertedero 1 y 2

$$P = 3H = 3 \cdot (0.18)$$

$$P1 = P2 \approx 0.55 \text{ m}$$

b) Correcta aireación en la lámina de agua.

Para tener una correcta aireación de la lámina de agua se recomienda que $L/H > 3$.

Vertedero de ingreso

$$\frac{L}{H} = \frac{0.80}{0.24}$$

$$\frac{L}{H} = 3.333$$

Vertedero 1 y 2

$$\frac{L}{H} = \frac{0.60}{0.18}$$

$$\frac{L}{H} = 3.333$$

4. Calculo de la velocidad de aproximación V_o .

Vertedero de ingreso

$$V_o = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B(P + H)} = \frac{0.16}{2.24 \cdot (0.75 + 0.24)}$$

$$V_o = 0.072150 \text{ m/s}$$

Vertedero 1 y 2

$$V_o = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B(P + H)} = \frac{0.08}{1.70 \cdot (0.60 + 0.18)}$$

$$V_o = 0.064464 \text{ m/s}$$

5. Calculo de la energía cinética hv .

Vertedero de ingreso

$$hv = \frac{V_o^2}{2g} = \frac{(0.072150)^2}{2 \cdot 9.81}$$

$$hv = 0.000265323 \text{ m}$$

Vertedero 1 y 2

$$hv = \frac{V_o^2}{2g} = \frac{(0.064464)^2}{2 \cdot 9.81}$$

$$hv = 0.000211806 \text{ m}$$

6. Determinación de los caudales de salida en los vertederos.

Vertedero de ingreso

$$Q = 1.84 \cdot \left(L - \frac{n \cdot H}{10} \right) \cdot [(H + hv)^{\frac{3}{2}} - (hv)^{\frac{3}{2}}]$$

$$Q = 1.84 \cdot \left(0.80 - \frac{2 \cdot (0.24)}{10} \right) \cdot [(0.24 + 0.0002653)^{\frac{3}{2}} - (0.0002653)^{\frac{3}{2}}]$$

$$Q = 0.16295 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vertedero 1 y 2

$$Q = 1.84 \cdot \left(L - \frac{n \cdot H}{10} \right) \cdot [(H + hv)^{\frac{3}{2}} - (hv)^{\frac{3}{2}}]$$

$$Q = 1.84 \cdot \left(0.60 - \frac{2 \cdot (0.18)}{10}\right) \cdot [(0.18 + 0.0002118)^{\frac{3}{2}} - (0.0002118)^{\frac{3}{2}}]$$

$$Q = 0.0794 \text{ m}^3/\text{s}$$

Existe un margen de error de +/- 3% permisible al utilizar la ecuación de Francis.

7. Determinación de las dimensiones de la caja repartidora de caudales.

Se deberá escoger entre los tres umbrales calculados y las tres cargas hidráulicas máximas para determinar la dimensión del tanque.

$$h = P. \text{max} + H. \text{max} + \text{Borde libre}$$

$$h = 0.75 + 0.24 + 0.10$$

$$h = 1.10 \text{ m}$$

Finalmente se obtiene las dimensiones del tanque repartidor que son:

$$a = 1.90 \text{ m}$$

$$b = 2.45 \text{ m}$$

$$h = 1.10 \text{ m}$$

3.3 MEDIDORES DE CAUDAL

Para poder determinar la cantidad de agua que está circulando por un canal se emplean frecuentemente los medidores de caudal. Estas estructuras también permiten descubrir si existen filtraciones, y si se distribuye en forma justa el líquido vital.

Sin duda alguna los vertederos son las estructuras hidráulicas más conocidas y las más utilizadas para medir caudales. “Existen vertederos que pueden ser de pared delgada y de pared gruesa, frecuentemente se utilizan los primeros para realizar trabajos de medición de caudales ya que estos proporcionan una mayor precisión” (Alvear, Olazával, & Noordholland de Jong, 1999, pág. 102).

En su publicación Cadena Navarro, (2012) recomienda emplear “vertederos de sección tipo triangular de 90° para medir caudales inferiores a los 25 lts/seg y con un tope de hasta 275 Lts/seg., mientras que los vertederos rectangulares se utilizan para estimar caudales de hasta 2000 Lts/seg” (pág. 152).

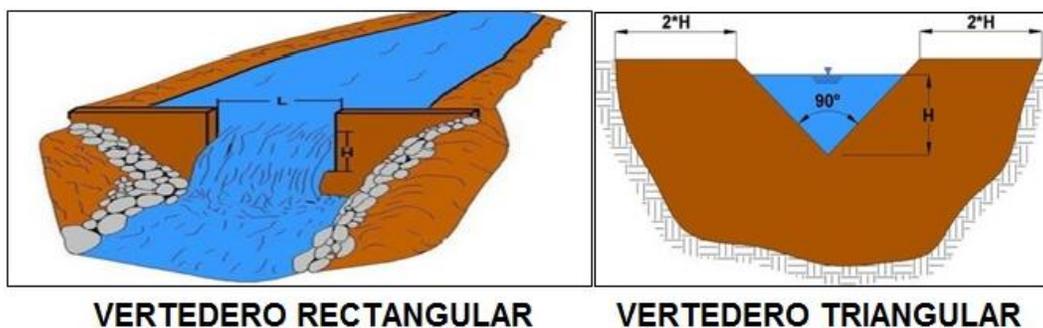


Figura 28. Tipos de vertederos por su forma

3.3.1 DISEÑO HIDRAULICO

Para el correcto diseño y funcionamiento de los vertederos se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El tipo y las dimensiones del vertedero a emplear serán elegidos en base a una estimación preliminar del caudal.
- La cresta y los lados del vertedero deben ser construidos de un espesor no mayor a los (3mm).
- El vertedero debe estar diseñado para aforar la carga máxima esperada en la corriente. Si es de madera conviene que la escotadura sea de metal biselado.
- En los vertederos triangulares es muy pequeña la influencia de la altura del umbral y de la velocidad de llegada. Para ello Cadena Navarro (2012) recomienda que “el ancho del canal de aproximación sea igual o mayor a 5 veces la carga sobre el vertedero, $B \geq 5H$ ” (pág. 157); además el vertedero debe colocarse en un tramo recto, en una longitud no inferior a 10 veces la longitud L de la cresta del vertedero.
- El punto donde se mide la carga es igual a $4H$ aguas arriba de la corriente en donde se coloca una estaca que debe estar nivelada a la cresta del vertedero.

3.3.1.1 Procedimiento

Para determinar las dimensiones geométricas de un vertedero rectangular se siguen los lineamientos 1, 2,3 ,4 ,5 y 6 descritos en la sección 3.2.2.1. En el caso de tratarse de un vertedero triangular se deberá emplear la siguiente formulación:

1. Para determinar el caudal en los vertederos triangulares con un ángulo $\alpha = 90^\circ$, debe emplearse la siguiente ecuación:

$$Q = 1.4 \cdot H^{5/2} \quad (41)$$

2. El ancho de la superficie de agua L , que tendrá un vertedero triangular se determina con la siguiente expresión:

$$L = 2 \cdot (H + Bl) * \tan \frac{\alpha}{2} \quad (42)$$

Donde:

L= Ancho de la superficie de agua en el vertedero [m].

H= Carga hidráulica sobre la coronación del aliviadero en metros [m].

Bl= Borde libre [m].

α = Angulo del vertedero triangular.

3. La distancia entre los bordes de la escotadura y las paredes laterales en un vertedero triangular deberan ser como minimo 2H.

3.3.1.2 Ejemplo de cálculo

Determinar el caudal que pasa por un vertedero triangular de 90°, con una carga de hidráulica H= 0.15 m, P= 0.10 m y un borde libre de 0.10 m.

Diseño hidráulico

1. Determinación del caudal

$$Q = 1.4 \cdot H^{\frac{5}{2}} = 1.4 \cdot (0.15)^{5/2}$$

$$Q = 0.120 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. El ancho de la superficie de agua L, que tendrá un vertedero triangular:

$$H = 0.15 \text{ m}$$

$$Bl = 0.10 \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$L = 2 \cdot (H + Bl) * \tan \frac{\alpha}{2} = 2 \cdot (0.15 + 0.10) * \tan \frac{90^\circ}{2}$$

$$L = 0.50 \text{ m}$$

3. La distancia entre los bordes de la escotadura y las paredes laterales en un vertedero triangular deberan ser como minimo 2H.

$$2H = 0.30 \text{ m}$$

CAPITULO IV

MANTENIMIENTO PARA LAS ESTRUCTURAS DE CONDUCCIÓN, DISTRIBUCIÓN Y MEDICIÓN.

4.1 GENERALIDADES

Los usuarios de un sistema de riego deben tener siempre presente, que cualquier estructura hidráulica está propenso a sufrir por deterioros o puede verse afectado por la ocurrencia de algún daño específico, lo cual genera inconvenientes en el suministro de agua hacia las parcelas y afectan directamente a la producción en esa zona. Para evitar estos problemas Castrillo, Abastoflor, Gandarillas, & Salazar (2011) señalan que es “imprescindible manejar procedimientos adecuados de prevención y reparación con la finalidad de asegurar la eficiencia, el desempeño y se pueda prolongar la vida útil de dichas obras hidráulicas, a dicho criterio expuesto se lo denomina como mantenimiento” (pág. 9).

Existen tres tipos bien definidos de mantenimientos los cuales son:

1. **Mantenimiento preventivo.-** Tiene como finalidad precautelar daños que pudieran ocasionarse en el sistema afectando su operación.
2. **Mantenimiento correctivo.-** Tiene como propósito reparar los daños que no se han podido evitar con el mantenimiento preventivo.
3. **Mantenimiento de emergencia.-** Cuando los equipos de un sistema han sufrido daños por alguna causa inesperada y requieren solución rápida para poner parcialmente operativo el sistema.

Las tareas más usuales de mantenimiento en un sistema de riego son:

- Limpieza y mantenimiento del canal.
- Limpieza de materia azolvada.

- Mantenimiento y limpieza de obras secundarias como: desarenador, aliviaderos, repartidores, pasos elevados.
- Reparación de tuberías y accesorios.
- Vigilancia y cuidado del sistema.

4.2 PROCESOS DE MANTENIMIENTO PARA LAS ESTRUCTURAS DE CONDUCCIÓN

4.2.1 CANALES



Figura 29. Mantenimiento de canales. Fuente: GADPC

Los trabajos de mantenimiento que deben de realizarse en un canal son los siguientes:

- Recorrer periódicamente los canales y constatar que no estén tapado por derrumbes obrados por las lluvias fuertes.
- Limpiar al menos 4 veces al año, al terminar cada uno de los trimestres, que coinciden con las épocas de la siembra, la cosecha y la época de lluvias.

- Cortar las malezas cada vez que crece, tanto en la caja del canal como en los bordes, para que el agua corra más rápido y no rebalse.
- Reparar los canales revestidos malogrados con cemento, arena y cal.

4.2.2 TUBERIAS

4.2.2.1 Tanques rompe presión.



Figura 30. Limpieza del tanque rompe presión. Fuente: GADPC

Los trabajos de mantenimiento que deben de realizarse en tanques rompe presión son los siguientes:

- Pintado de las tapas metálicas del tanque con pintura anticorrosiva.
- Engrasado de las compuertas, dos veces al año.
- Limpieza del tanque.

4.2.2.2 Tuberías



Figura 31. Reparación de una tubería plástica de PVC. Fuente: GADPC

Los trabajos de mantenimiento que deben de aplicarse a las tuberías son las siguientes:

- Las tuberías de PVC y PE deben estar enterradas, para que el sol, los animales o las personas no los rompan.
- Reparación puntual por roturas de tuberías.
- Reemplazo de tuberías, por antigüedad, falta de capacidad, desgaste y poco cobertura.

4.2.2.3 Válvulas

Los trabajos de mantenimiento que deben de realizarse en las distintas válvulas que son utilizadas en una conducción entubada se describen a continuación.

4.2.2.3.1 Válvulas de limpieza y aire

- Engrasado periódico de los exteriores de los vástagos, con aceite de pipa o grasa.
- Mantenimiento de la pintura y engrasado de compuertas.
- Limpieza de caja.

4.2.2.3.2 Válvulas reguladoras de presión

- Pintado de las tapas metálicas de las cajas con pintura anticorrosiva.
- Engrasado de las válvulas cada tres meses.
- Limpiar los pilotos de las válvulas, tomando en cuenta que se coloquen las mangueras en sus respectivas posiciones, de acuerdo a la numeración que está en la válvula.

4.2.3 RAPIDAS

Los trabajos de mantenimiento que deben de aplicarse a las rápidas son las siguientes:

- Se requiere revisar las juntas de empalme y mantener sin piedras la rápida, así mismo se recomienda aplicar impermeabilizante con brocha en las paredes y piso impedir las filtraciones.
- Al final del canal de la rápida, se tiene el colchón disipador, su función es evitar que el agua salte afuera de las paredes de mencionada estructura cuando se genera el resalto hidráulico. Se debe revisar que en el colchón disipador no contenga piedras y/o arenas, ni rajaduras en sus paredes y/o piso.

4.3 PROCESOS DE MANTENIMIENTO PARA LAS ESTRUCTURAS DE DISTRIBUCION Y MEDICIÓN DE CAUDALES

4.3.1 REPARTIDORES DE CAUDAL

Los trabajos de mantenimiento que deben aplicarse a los tanques repartidores de caudal son las siguientes:

- Limpiar la basura que queda en los vertederos.
- Cuando se utilice compuertas para regular los caudales en el tanque repartidor, se debe de engrasar y pintar las compuertas.

4.3.2 MEDIDORES DE CAUDAL

Los trabajos de mantenimiento que deben aplicarse a los vertederos son los siguientes:

- Limpiar la basura que queda en los vertederos.
- Pintar los vertederos.

CONCLUSIONES

Finalizado el presente trabajo de titulación he podido llegar a determinar las siguientes conclusiones importantes que se las describe a continuación:

- En primera instancia se definen las dimensiones del canal bajo los parámetros establecidos en el flujo uniforme y luego se ajustan las dimensiones definitivas a las condiciones y características del proyecto esto con el fin de hacerlas practicas constructivamente.
- Cuando existe la presencia de sedimentos y vegetación en los tramos de un canal, estos ocasionan una turbulencia considerable, lo cual genera pérdidas de energía y retraso en el flujo. Para evitar estos inconvenientes es necesario regirse a los límites mínimos y máximos de velocidad admisibles en los diseños.
- Un aspecto transcendental en el diseño de canales revestidos es el costo del material del revestimiento y el desarrollo de las dimensiones del canal que minimicen el costo de revestimiento.
- Para el diseño y la construcción de un canal, principalmente se debe hacer un análisis financiero, y considerar la relación costo beneficio como parámetro de decisión para la construcción de dicha obra hidráulica.
- La selección de los diámetros adecuados que se colocarán en la red de conducción deberán acoplarse a las exigencias del proyecto; estas consideraciones deberán estar profundamente ligadas al factor económico.
- En la zona de transición de las rápidas de gran pendiente, la pérdida de energía depende exclusivamente del ángulo que forma el eje del canal de ingreso con los aleros de la transición. A veces resultan transiciones muy largas, para ciertos ángulos, lo cual puede generar incrementos innecesarios en el costo final que tendrá la obra.

- Los tanques repartidores de caudal son las estructuras más sencillas de implantar, aunque la falta de uniformidad en la división de caudales las hace desventajosas.
- El vertedero triangular puede trabajar con flujos bastante pequeños como se pudo constatar con los cálculos hidráulicos; así como también con flujos bastante grandes, en cambio el vertedero rectangular, preferiblemente, se lo debe emplear para poder medir caudales grandes; pues si los caudales a medir son muy pequeños por debajo de los 10 Lts/seg y con una carga hidráulica menor a los 10 cm, la longitud del vertedero rectangular de pared delgada resultara ser muy estrecha y no muy factible de construir.
- Para el buen funcionamiento de toda obra de riego es indispensable la correcta localización, diseño y mantenimiento periódico. Es sumamente importante instruir a los operarios y usuarios de los sistemas de riego sobre los procedimientos que hay seguir para poder realizar un correcto mantenimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvear, J., Olazábal, H., & Noordholland de Jong, J. (1999). *Infraestructura de Riego: Elementos técnicos y sociales*. Quito: CARAMEN.
- Arocha Revelo, S. (1977). *Abastecimientos de Agua: Teoría y Diseño*. Caracas: VEGA.
- Bosch, V. (1993). *Structures for Water Control and Distribution*. Roma: FAO.
- Bottega, A., & Hoogedam, P. (2012). *Obras de Riego para Zonas Montañosas*. Cochabamba: PRONAR.
- Cadena Navarro, V. H. (2012). *Hablemos de Riego*. Ibarra: CREADORES GRAFICOS.
- Castrillo, C., Abastoflor, V., Gandarillas, H., & Salazar, L. (2011). *La problemática del mantenimiento de la infraestructura hidráulica mejorada*. Cochabamba: PRONAR.
- Corcho Romero, F., & Duque Serna, J. I. (1993). *Acueductos: Teoría y Diseño*. Medellín: UNIVERSIDAD DE MEDELLIN.
- Cordero O, P. (1984). *Apuntes de Hidráulica*. Cuenca.
- CPE INEN 005 parte 9-1:92. (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. En *Captación y conducción para proyectos de abastecimientos de agua potable* (pág. 293). Quito.
- García, J., Ramilo, D. N., & Alcoba, D. (2013). *Sistemas de Conducción de Agua para la Región Altoandina*. Buenos Aires: INTA.
- MAGAP. (2014). Manual de Riego Parcelario. *Somos MAGAP*, 20.
- Rocha Felices, A. (1978). *Hidráulica de Tuberías y Canales*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería Lima.

- Saldarriaga, J. (2016). *Hidráulica de Tuberías: Abastecimiento de Agua, Redes y Riegos*. Mexico DF.: Alfaomega.
- SENAGUA. (2012). *Norma de diseño para sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural*. Quito.
- Sotelo Avila, G. (1976). *Hidráulica General, Fundamentos*. México: Limusa.
- Sotelo Avila, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. México: Facultad de Ingeniería.Universidad Autónoma de México.
- Sviatoslav Krochin. (1982). *Diseño Hidráulico*. Quito: UNIVERSITARIA.
- Tenelema Magallanes, S. T. (2015). *Diseño y simulación en un modelo físico de una estructura derivadora de caudal en forma porcentual*. Quito.
- Tixe, S. (2004). *Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimientos de agua rural*. Lima: COSUDE.
- Ven Te , C. (1983). *Hidraulica de Canales Abiertos*. México: Diana.
- Villón Bejar, M. (1995). *Hidraulica de Canales*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Villón Bejar, M. (2003). *Diseño de Estructuras Hidráulicas*. Instituto tecnologico de Costa Riva.

ANEXOS

ANEXO A. Resultado de los cálculos hidráulicos

DIMENSIONES DE CANALES Y TUBERIAS A FLUJO LIBRE

GRUPO		TUBERIA		CANAL REVESTIDO															
MATERIAL		PVC		HORMIGÓN															
Pendiente del muro (Taluz Z)				(1: Z= 1:0)				(1: Z= 1:0.5)				(1: Z= 1:0.58)				(1: Z= 1:1)			
COEF.MANNING (n)		0.010		0.013															
Pendiente	Caudal (Lts/seg)	Di (mm)	Di inter. (m)	b(m)	y (m)	H (m)	b(m)	y (m)	H (m)	T(m)	b(m)	y (m)	H (m)	T(m)	b(m)	y (m)	H (m)	T(m)	
1/1000	400	760	0.7000	0.70	0.70	0.95	0.75	0.43	0.60	1.35	0.75	0.42	0.60	1.45	0.75	0.38	0.55	1.85	
	380	760	0.7000	0.65	0.65	0.90	0.75	0.42	0.60	1.35	0.75	0.41	0.60	1.45	0.75	0.37	0.55	1.85	
	360	760	0.7000	0.65	0.65	0.90	0.75	0.41	0.55	1.30	0.75	0.40	0.55	1.40	0.75	0.36	0.50	1.75	
	340	760	0.7000	0.65	0.65	0.90	0.75	0.39	0.55	1.30	0.75	0.38	0.55	1.40	0.75	0.35	0.50	1.75	
	320	760	0.7000	0.65	0.65	0.90	0.75	0.38	0.55	1.30	0.75	0.37	0.55	1.40	0.75	0.34	0.50	1.75	
	300	760	0.7000	0.60	0.60	0.80	0.75	0.37	0.50	1.25	0.75	0.36	0.50	1.35	0.75	0.33	0.45	1.65	
	280	760	0.7000	0.60	0.60	0.80	0.75	0.35	0.50	1.25	0.75	0.34	0.50	1.35	0.75	0.31	0.45	1.65	
	260	650	0.6000	0.60	0.60	0.80	0.75	0.34	0.50	1.25	0.75	0.33	0.45	1.30	0.75	0.30	0.45	1.65	
	240	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.32	0.45	1.20	0.75	0.31	0.45	1.30	0.75	0.29	0.40	1.55	
	220	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.30	0.45	1.20	0.75	0.30	0.40	1.25	0.75	0.27	0.40	1.55	
	200	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.50	0.37	0.55	1.05	0.50	0.35	0.50	1.10	0.50	0.31	0.45	1.40	
	180	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.50	0.34	0.50	1.00	0.50	0.33	0.50	1.10	0.50	0.30	0.40	1.30	
	160	540	0.5000	0.50	0.50	0.70	0.50	0.32	0.50	1.00	0.50	0.31	0.45	1.05	0.50	0.28	0.40	1.30	
	140	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.50	0.30	0.45	0.95	0.50	0.29	0.40	1.00	0.50	0.26	0.35	1.20	
	120	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.50	0.27	0.40	0.90	0.50	0.26	0.40	1.00	0.50	0.24	0.35	1.20	
	100	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.30	0.32	0.45	0.75	0.30	0.31	0.45	0.85	0.30	0.27	0.40	1.10	
	80	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.30	0.28	0.40	0.70	0.30	0.27	0.40	0.80	0.30	0.24	0.35	1.00	
	60	400	0.3640	0.40	0.40	0.55	0.30	0.28	0.40	0.70	0.30	0.27	0.40	0.80	0.30	0.24	0.35	1.00	
40	400	0.3640	0.40	0.40	0.55	0.30	0.28	0.40	0.70	0.30	0.27	0.40	0.80	0.30	0.24	0.35	1.00		
20	280	0.2500	0.40	0.40	0.55	0.30	0.28	0.40	0.70	0.30	0.27	0.40	0.80	0.30	0.24	0.35	1.00		

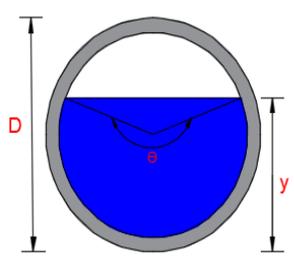
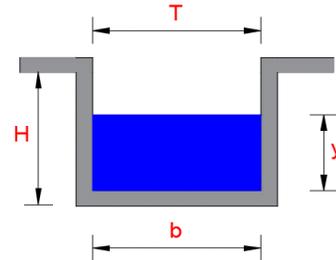
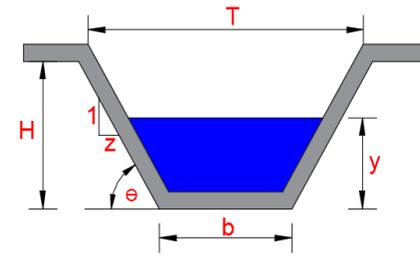
2/1000	400	760	0.7000	0.60	0.60	0.80	0.75	0.35	0.50	1.25	0.75	0.34	0.50	1.35	0.75	0.31	0.45	1.65
	380	650	0.6000	0.60	0.60	0.80	0.75	0.34	0.50	1.25	0.75	0.33	0.50	1.35	0.75	0.31	0.45	1.65
	360	650	0.6000	0.60	0.60	0.80	0.75	0.33	0.50	1.25	0.75	0.32	0.45	1.30	0.75	0.30	0.40	1.55
	340	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.32	0.45	1.20	0.75	0.31	0.45	1.30	0.75	0.29	0.40	1.55
	320	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.31	0.45	1.20	0.75	0.30	0.45	1.30	0.75	0.28	0.40	1.55
	300	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.30	0.40	1.15	0.75	0.29	0.40	1.25	0.75	0.27	0.40	1.55
	280	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.28	0.40	1.15	0.75	0.28	0.40	1.25	0.75	0.26	0.35	1.45
	260	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.27	0.40	1.15	0.75	0.27	0.40	1.25	0.75	0.25	0.35	1.45
	240	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.26	0.35	1.10	0.75	0.25	0.35	1.20	0.75	0.24	0.35	1.45
	220	540	0.5000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.24	0.35	1.10	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.22	0.35	1.45
	200	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.50	0.30	0.60	1.10	0.50	0.29	0.40	1.00	0.50	0.26	0.60	1.70
	180	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.50	0.28	0.60	1.10	0.50	0.27	0.40	1.00	0.50	0.25	0.60	1.70
	160	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.50	0.26	0.60	1.10	0.50	0.25	0.35	0.95	0.50	0.23	0.60	1.70
	140	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.24	0.55	1.05	0.50	0.23	0.35	0.95	0.50	0.21	0.55	1.60
	120	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.22	0.55	1.05	0.50	0.21	0.30	0.85	0.50	0.20	0.55	1.60
	100	500	0.4500	0.35	0.35	0.50	0.30	0.26	0.40	0.70	0.30	0.26	0.35	0.75	0.30	0.22	0.33	0.96
	80	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.30	0.23	0.35	0.65	0.30	0.22	0.35	0.75	0.30	0.20	0.30	0.90
	60	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.30	0.20	0.30	0.60	0.30	0.19	0.30	0.65	0.30	0.17	0.25	0.80
40	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.25	0.55	0.30	0.15	0.20	0.55	0.30	0.14	0.20	0.70	
20	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.20	0.50	0.30	0.15	0.20	0.55	0.30	0.09	0.15	0.60	
3/1000	400	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.31	0.45	1.20	0.75	0.31	0.45	1.30	0.75	0.28	0.40	1.55
	380	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.30	0.44	1.19	0.75	0.30	0.40	1.25	0.75	0.27	0.40	1.55
	360	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.29	0.40	1.15	0.75	0.29	0.40	1.25	0.75	0.26	0.40	1.55
	340	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.28	0.40	1.15	0.75	0.28	0.40	1.25	0.75	0.26	0.35	1.45
	320	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.27	0.40	1.15	0.75	0.27	0.40	1.25	0.75	0.25	0.35	1.45
	300	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.26	0.70	1.45	0.75	0.26	0.35	1.20	0.75	0.24	0.70	2.15
	280	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.25	0.70	1.45	0.75	0.25	0.35	1.20	0.75	0.23	0.70	2.15
	260	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.24	0.70	1.45	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.22	0.70	2.15
	240	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.23	0.60	1.35	0.75	0.22	0.35	1.20	0.75	0.21	0.60	1.95
	220	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.60	1.35	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.20	0.60	1.95
	200	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.50	0.26	0.40	0.90	0.50	0.26	0.35	0.95	0.50	0.23	0.35	1.20
	180	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.25	0.35	0.85	0.50	0.24	0.35	0.95	0.50	0.22	0.30	1.10
	160	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.23	0.35	0.85	0.50	0.22	0.35	0.95	0.50	0.21	0.30	1.10
	140	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.21	0.35	0.85	0.50	0.21	0.30	0.85	0.50	0.19	0.30	1.10
	120	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.19	0.30	0.80	0.50	0.19	0.30	0.85	0.50	0.17	0.25	1.00
	100	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.30	0.24	0.35	0.65	0.30	0.23	0.35	0.75	0.30	0.20	0.30	0.90
	80	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.30	0.21	0.30	0.60	0.30	0.20	0.30	0.65	0.30	0.18	0.25	0.80
	60	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.17	0.25	0.55	0.30	0.17	0.25	0.60	0.30	0.15	0.25	0.80
40	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.14	0.20	0.50	0.30	0.13	0.20	0.55	0.30	0.12	0.20	0.70	
20	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.20	0.50	0.30	0.09	0.15	0.50	0.30	0.08	0.15	0.60	

4/1000	400	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.29	0.40	1.15	0.75	0.28	0.40	1.25	0.75	0.26	0.35	1.45
	380	650	0.6000	0.55	0.55	0.75	0.75	0.28	0.40	1.15	0.75	0.27	0.40	1.25	0.75	0.25	0.35	1.45
	360	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.27	0.40	1.15	0.75	0.26	0.40	1.25	0.75	0.24	0.35	1.45
	340	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.26	0.35	1.10	0.75	0.25	0.35	1.20	0.75	0.24	0.35	1.45
	320	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.25	0.35	1.10	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.23	0.35	1.45
	300	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.24	0.35	1.10	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.22	0.30	1.35
	280	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.23	0.35	1.10	0.75	0.23	0.35	1.20	0.75	0.21	0.30	1.35
	260	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.30	1.05	0.75	0.22	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	240	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.21	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	220	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.20	0.30	1.05	0.75	0.19	0.30	1.10	0.75	0.18	0.30	1.35
	200	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.24	0.35	0.85	0.50	0.24	0.35	0.95	0.50	0.21	0.30	1.10
	180	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.23	0.35	0.85	0.50	0.22	0.35	0.95	0.50	0.20	0.30	1.10
	160	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.50	0.21	0.35	0.85	0.50	0.21	0.30	0.85	0.50	0.19	0.30	1.10
	140	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.19	0.30	0.80	0.50	0.19	0.30	0.85	0.50	0.18	0.25	1.00
	120	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.18	0.30	0.80	0.50	0.17	0.25	0.80	0.50	0.16	0.25	1.00
	100	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.30	0.22	0.30	0.60	0.30	0.21	0.30	0.65	0.30	0.19	0.30	0.90
	80	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.30	0.19	0.30	0.60	0.30	0.18	0.30	0.65	0.30	0.16	0.25	0.80
	60	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.16	0.25	0.55	0.30	0.16	0.25	0.59	0.30	0.14	0.20	0.70
40	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.12	0.20	0.50	0.30	0.12	0.20	0.55	0.30	0.11	0.20	0.70	
20	220	0.2000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.20	0.50	0.30	0.08	0.15	0.50	0.30	0.08	0.15	0.60	
5/1000	400	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.27	0.40	1.15	0.75	0.26	0.40	1.25	0.75	0.24	0.35	1.45
	380	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.26	0.35	1.10	0.75	0.25	0.35	1.20	0.75	0.24	0.35	1.45
	360	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.25	0.35	1.10	0.75	0.25	0.35	1.20	0.75	0.23	0.35	1.45
	340	650	0.6000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.24	0.35	1.10	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.22	0.35	1.45
	320	540	0.5000	0.45	0.45	0.65	0.75	0.23	0.35	1.10	0.75	0.23	0.35	1.20	0.75	0.21	0.30	1.35
	300	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.35	1.10	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.21	0.30	1.35
	280	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.21	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	260	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.20	0.30	1.05	0.75	0.20	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	240	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.19	0.30	1.10	0.75	0.18	0.30	1.35
	220	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.18	0.30	1.05	0.75	0.18	0.30	1.10	0.75	0.17	0.25	1.25
	200	500	0.4500	0.40	0.40	0.60	0.50	0.23	0.35	0.85	0.50	0.22	0.35	0.95	0.50	0.20	0.30	1.10
	180	500	0.4500	0.40	0.40	0.60	0.50	0.21	0.35	0.85	0.50	0.21	0.30	0.85	0.50	0.19	0.30	1.10
	160	500	0.4500	0.35	0.35	0.55	0.50	0.20	0.30	0.80	0.50	0.19	0.30	0.85	0.50	0.18	0.25	1.00
	140	400	0.3640	0.35	0.35	0.55	0.50	0.18	0.30	0.80	0.50	0.18	0.25	0.80	0.50	0.17	0.25	1.00
	120	400	0.3640	0.35	0.35	0.55	0.50	0.16	0.25	0.75	0.50	0.16	0.25	0.80	0.50	0.15	0.25	1.00
	100	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.30	0.20	0.30	0.60	0.30	0.20	0.30	0.65	0.30	0.17	0.25	0.80
	80	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.30	0.18	0.25	0.55	0.30	0.17	0.25	0.60	0.30	0.15	0.25	0.80
	60	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.20	0.50	0.30	0.15	0.20	0.55	0.30	0.13	0.20	0.70
40	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.12	0.20	0.50	0.30	0.11	0.20	0.55	0.30	0.11	0.15	0.60	
20	220	0.2000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.20	0.50	0.30	0.07	0.15	0.50	0.30	0.07	0.15	0.60	

6/1000	400	540	0.5000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.25	0.35	1.10	0.75	0.25	0.35	1.20	0.75	0.23	0.35	1.45
	380	540	0.5000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.24	0.35	1.10	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.22	0.35	1.45
	360	540	0.5000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.24	0.35	1.10	0.75	0.23	0.35	1.20	0.75	0.22	0.30	1.35
	340	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.23	0.35	1.10	0.75	0.22	0.35	1.20	0.75	0.21	0.30	1.35
	320	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.30	1.05	0.75	0.22	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	300	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.21	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	280	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.20	0.30	1.05	0.75	0.20	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	260	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.19	0.30	1.10	0.75	0.18	0.30	1.35
	240	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.18	0.30	1.05	0.75	0.18	0.30	1.10	0.75	0.17	0.25	1.25
	220	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.17	0.25	1.00	0.75	0.17	0.25	1.05	0.75	0.16	0.25	1.25
	200	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.50	0.21	0.40	0.90	0.50	0.21	0.30	0.85	0.50	0.19	0.30	1.10
	180	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.50	0.20	0.30	0.80	0.50	0.20	0.30	0.85	0.50	0.18	0.30	1.10
	160	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.19	0.30	0.80	0.50	0.18	0.30	0.85	0.50	0.17	0.25	1.00
	140	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.17	0.30	0.80	0.50	0.17	0.25	0.80	0.50	0.16	0.25	1.00
	120	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.50	0.16	0.25	0.75	0.50	0.15	0.25	0.80	0.50	0.14	0.20	0.90
	100	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.30	0.19	0.30	0.60	0.30	0.19	0.30	0.65	0.30	0.17	0.25	0.80
	80	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.17	0.25	0.55	0.30	0.16	0.25	0.60	0.30	0.15	0.20	0.70
	60	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.14	0.20	0.50	0.30	0.14	0.20	0.55	0.30	0.13	0.20	0.70
40	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.11	0.15	0.45	0.30	0.11	0.15	0.50	0.30	0.10	0.15	0.60	
20	220	0.2000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.07	0.15	0.45	0.30	0.07	0.15	0.50	0.30	0.07	0.15	0.60	
7/1000	400	540	0.5000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.24	0.35	1.10	0.75	0.24	0.35	1.20	0.75	0.22	0.35	1.45
	380	540	0.5000	0.50	0.50	0.70	0.75	0.23	0.35	1.10	0.75	0.23	0.35	1.20	0.75	0.21	0.30	1.35
	360	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.35	1.10	0.75	0.22	0.35	1.20	0.75	0.21	0.30	1.35
	340	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	320	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.21	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	300	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.20	0.30	1.05	0.75	0.20	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	280	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.19	0.30	1.10	0.75	0.18	0.25	1.25
	260	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.18	0.29	1.04	0.75	0.18	0.30	1.10	0.75	0.17	0.25	1.25
	240	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.17	0.25	1.00	0.75	0.17	0.25	1.05	0.75	0.16	0.25	1.25
	220	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.17	0.25	1.00	0.75	0.16	0.25	1.05	0.75	0.16	0.25	1.25
	200	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.50	0.20	0.30	0.80	0.50	0.20	0.30	0.85	0.50	0.18	0.30	1.10
	180	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.19	0.30	0.80	0.50	0.19	0.30	0.85	0.50	0.17	0.25	1.00
	160	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.18	0.30	0.80	0.50	0.17	0.25	0.80	0.50	0.16	0.25	1.00
	140	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.16	0.30	0.80	0.50	0.16	0.25	0.80	0.50	0.15	0.20	0.90
	120	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.50	0.15	0.25	0.75	0.50	0.15	0.20	0.75	0.50	0.14	0.20	0.90
	100	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.30	0.18	0.30	0.60	0.30	0.18	0.25	0.60	0.30	0.16	0.25	0.80
	80	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.16	0.25	0.55	0.30	0.16	0.25	0.60	0.30	0.14	0.20	0.70
	60	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.13	0.20	0.50	0.30	0.13	0.20	0.55	0.30	0.12	0.20	0.70
40	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.10	0.15	0.45	0.30	0.10	0.15	0.50	0.30	0.10	0.15	0.60	
20	220	0.2000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.07	0.15	0.45	0.30	0.07	0.15	0.50	0.30	0.06	0.15	0.60	

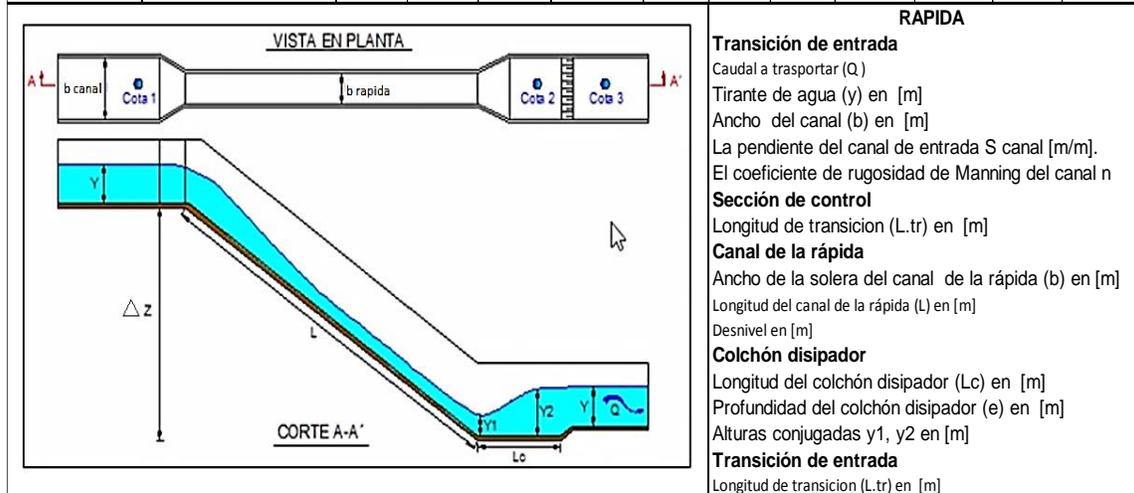
8/1000	400	540	0.5000	0.45	0.45	0.65	0.75	0.23	0.35	1.10	0.75	0.23	0.35	1.20	0.75	0.21	0.30	1.35
	380	540	0.5000	0.45	0.45	0.65	0.75	0.22	0.35	1.10	0.75	0.22	0.30	1.10	0.75	0.21	0.30	1.35
	360	540	0.5000	0.45	0.45	0.65	0.75	0.22	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	340	500	0.4500	0.45	0.45	0.65	0.75	0.21	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	320	500	0.4500	0.45	0.45	0.62	0.75	0.20	0.30	1.05	0.75	0.20	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	300	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.19	0.30	1.10	0.75	0.18	0.25	1.25
	280	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.18	0.30	1.05	0.75	0.18	0.30	1.10	0.75	0.17	0.25	1.25
	260	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.18	0.25	1.00	0.75	0.17	0.25	1.05	0.75	0.17	0.25	1.25
	240	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.17	0.25	1.00	0.75	0.17	0.25	1.05	0.75	0.16	0.25	1.25
	220	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.16	0.25	1.00	0.75	0.16	0.25	1.05	0.75	0.15	0.25	1.25
	200	400	0.3640	0.35	0.35	0.55	0.50	0.20	0.30	0.80	0.50	0.19	0.30	0.85	0.50	0.18	0.25	1.00
	180	400	0.3640	0.35	0.35	0.55	0.50	0.18	0.30	0.80	0.50	0.18	0.25	0.80	0.50	0.17	0.25	1.00
	160	400	0.3640	0.35	0.35	0.55	0.50	0.17	0.30	0.80	0.50	0.17	0.25	0.80	0.50	0.16	0.25	1.00
	140	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.50	0.16	0.30	0.80	0.50	0.15	0.25	0.80	0.50	0.14	0.20	0.90
	120	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.50	0.14	0.25	0.75	0.50	0.14	0.20	0.75	0.50	0.13	0.20	0.90
	100	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.18	0.25	0.55	0.30	0.17	0.25	0.60	0.30	0.15	0.25	0.80
	80	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.25	0.55	0.30	0.15	0.20	0.55	0.30	0.14	0.20	0.70
	60	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.13	0.20	0.50	0.30	0.13	0.20	0.55	0.30	0.12	0.20	0.70
40	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.10	0.15	0.45	0.30	0.10	0.15	0.50	0.30	0.09	0.15	0.60	
20	220	0.2000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.07	0.15	0.45	0.30	0.06	0.15	0.50	0.30	0.06	0.15	0.60	
9/1000	400	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.35	1.10	0.75	0.22	0.30	1.10	0.75	0.21	0.30	1.35
	380	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	360	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.21	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	340	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.20	0.30	1.05	0.75	0.20	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	320	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.19	0.30	1.10	0.75	0.18	0.30	1.35
	300	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.18	0.30	1.10	0.75	0.17	0.25	1.25
	280	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.18	0.25	1.00	0.75	0.18	0.25	1.05	0.75	0.17	0.25	1.25
	260	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.17	0.25	1.00	0.75	0.17	0.25	1.05	0.75	0.16	0.25	1.25
	240	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.16	0.25	1.00	0.75	0.16	0.25	1.05	0.75	0.15	0.25	1.25
	220	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.15	0.25	1.00	0.75	0.15	0.25	1.05	0.75	0.15	0.20	1.15
	200	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.19	0.30	0.80	0.50	0.18	0.30	0.85	0.50	0.17	0.25	1.00
	180	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.18	0.30	0.80	0.50	0.17	0.25	0.80	0.50	0.16	0.25	1.00
	160	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.16	0.30	0.80	0.50	0.16	0.25	0.80	0.50	0.15	0.25	1.00
	140	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.50	0.15	0.30	0.80	0.50	0.15	0.20	0.75	0.50	0.14	0.20	0.90
	120	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.50	0.14	0.25	0.75	0.50	0.14	0.20	0.75	0.50	0.13	0.20	0.90
	100	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.17	0.25	0.55	0.30	0.17	0.25	0.60	0.30	0.15	0.20	0.70
	80	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.15	0.20	0.50	0.30	0.14	0.20	0.55	0.30	0.13	0.20	0.70
	60	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.12	0.20	0.50	0.30	0.12	0.20	0.55	0.30	0.11	0.20	0.70
40	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.10	0.15	0.45	0.30	0.10	0.15	0.50	0.30	0.09	0.15	0.60	
20	220	0.2000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.06	0.15	0.45	0.30	0.06	0.15	0.50	0.30	0.06	0.15	0.60	

10/1000	400	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.22	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.20	0.30	1.35
	380	540	0.5000	0.45	0.45	0.60	0.75	0.21	0.30	1.05	0.75	0.21	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	360	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.20	0.30	1.05	0.75	0.20	0.30	1.10	0.75	0.19	0.30	1.35
	340	500	0.4500	0.45	0.45	0.60	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.19	0.30	1.10	0.75	0.18	0.30	1.35
	320	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.19	0.30	1.05	0.75	0.18	0.30	1.10	0.75	0.18	0.25	1.25
	300	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.18	0.25	1.00	0.75	0.18	0.25	1.05	0.75	0.17	0.25	1.25
	280	500	0.4500	0.40	0.40	0.55	0.75	0.17	0.25	1.00	0.75	0.17	0.25	1.05	0.75	0.16	0.25	1.25
	260	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.16	0.25	1.00	0.75	0.16	0.25	1.05	0.75	0.16	0.25	1.25
	240	440	0.4000	0.40	0.40	0.55	0.75	0.16	0.25	1.00	0.75	0.15	0.25	1.05	0.75	0.15	0.20	1.15
	220	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.75	0.15	0.20	0.95	0.75	0.15	0.20	1.00	0.75	0.14	0.20	1.15
	200	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.18	0.30	0.80	0.50	0.18	0.25	0.80	0.50	0.17	0.25	1.00
	180	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.17	0.30	0.80	0.50	0.17	0.25	0.80	0.50	0.16	0.25	1.00
	160	400	0.3640	0.35	0.35	0.50	0.50	0.16	0.30	0.80	0.50	0.16	0.25	0.80	0.50	0.15	0.20	0.90
	140	400	0.3640	0.30	0.30	0.40	0.50	0.15	0.30	0.80	0.50	0.14	0.20	0.75	0.50	0.14	0.20	0.90
	120	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.50	0.13	0.25	0.75	0.50	0.13	0.20	0.75	0.50	0.12	0.20	0.90
	100	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.16	0.25	0.55	0.30	0.16	0.25	0.60	0.30	0.14	0.20	0.70
	80	335	0.3000	0.30	0.30	0.40	0.30	0.14	0.20	0.50	0.30	0.14	0.20	0.55	0.30	0.13	0.20	0.70
	60	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.12	0.20	0.50	0.30	0.12	0.20	0.55	0.30	0.11	0.15	0.60
	40	280	0.2500	0.30	0.30	0.40	0.30	0.09	0.15	0.45	0.30	0.09	0.15	0.50	0.30	0.09	0.15	0.60
	20	175	0.1600	0.30	0.30	0.40	0.30	0.06	0.15	0.45	0.30	0.06	0.15	0.50	0.30	0.06	0.15	0.60

TUBERIA	CANAL RECTANGULAR	CANAL TRAPEZOIDAL
		
Borde libre 1/3 del tirante de agua (y)	Borde libre 1/3 del tirante de agua (y)	Borde libre 1/3 del tirante de agua (y)
	b=y	

DIMENSIONES DE RAPIDAS DE GRAN PENDIENTE

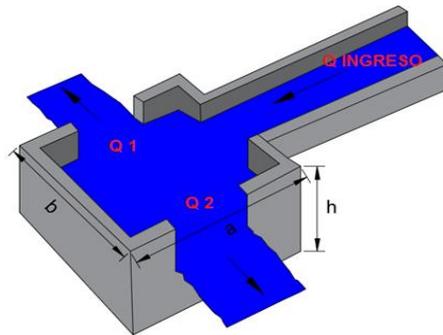
GRUPO		CANAL REVESTIDO			RAPIDA DE GRAN PENDIENTE							
MATERIAL		HORMIGÓN			HORMIGÓN							
Pendiente del muro (Taluz Z)		(1: Z= 1:0)			(1: Z= 1:0)							
COEF.MANNING (n)		0.013			0.013							
Pendiente canal de Ingreso / Salida		0.003										
Pendiente %	Caudal (Lts/seg)	b(m)	y (m)	H (m)	L tr (m)	b (m)	L(m)	Lc(m)	y1 (m)	y2 (m)	e(m)	h (m)
5	400	0.55	0.55	0.75	0.10	0.50	100	2.30	0.20	0.64	0.20	0.90
	300	0.50	0.50	0.70	0.10	0.45	100	1.90	0.18	0.55	0.15	0.90
	200	0.45	0.45	0.60	0.15	0.40	100	1.30	0.16	0.42	0.10	0.90
	160	0.40	0.40	0.55	0.10	0.35	100	1.30	0.15	0.40	0.10	0.85
10	400	0.55	0.55	0.75	0.10	0.50	100	3.10	0.16	0.76	0.35	0.90
	300	0.50	0.50	0.70	0.10	0.45	100	2.60	0.14	0.65	0.30	0.90
	200	0.45	0.45	0.60	0.15	0.40	100	1.90	0.13	0.50	0.15	0.85
	160	0.40	0.40	0.55	0.10	0.35	100	1.90	0.11	0.48	0.20	0.85
15	400	0.55	0.55	0.75	0.10	0.50	100	3.50	0.13	0.83	0.40	0.90
	300	0.50	0.50	0.70	0.10	0.45	100	3.00	0.12	0.71	0.35	0.90
	200	0.45	0.45	0.60	0.15	0.40	100	2.20	0.11	0.55	0.20	0.85
	160	0.40	0.40	0.55	0.10	0.35	100	2.20	0.10	0.53	0.30	0.85
20	400	0.55	0.55	0.75	0.10	0.50	100	3.80	0.12	0.88	0.50	0.90
	300	0.50	0.50	0.70	0.10	0.45	100	3.30	0.11	0.76	0.40	0.85
	200	0.45	0.45	0.60	0.15	0.40	100	2.50	0.10	0.58	0.25	0.85
	160	0.40	0.40	0.55	0.10	0.35	100	2.40	0.09	0.56	0.30	0.85
25	400	0.55	0.55	0.75	0.10	0.50	100	4.10	0.11	0.92	0.55	0.90
	300	0.50	0.50	0.70	0.10	0.45	100	3.50	0.10	0.79	0.45	0.85
	200	0.45	0.45	0.60	0.15	0.40	100	2.60	0.09	0.61	0.30	0.85
	160	0.40	0.40	0.55	0.10	0.35	100	2.60	0.08	0.58	0.30	0.80
30	400	0.55	0.55	0.75	0.10	0.50	100	4.30	0.11	0.95	0.55	0.90
	300	0.50	0.50	0.70	0.10	0.45	100	3.70	0.10	0.82	0.45	0.85
	200	0.45	0.45	0.60	0.15	0.40	100	2.80	0.09	0.63	0.30	0.85
	160	0.40	0.40	0.55	0.10	0.35	100	2.70	0.08	0.61	0.30	0.80



DIMENSIONES DE TANQUES REPARTIDORES DE CAUDAL

TANQUE REPARTIDOR DE CAUDALES														
CAUDAL DE INGRESO	CARGA HIDRAULICA	VERTEDERO INGRESO		CAUDAL 1	CARGA HIDRAULICA	VERTEDERO 1		CAUDAL 2	CARGA HIDRAULICA	VERTEDERO 2		DIMENSIONES DEL TANQUE		
(Lts/seg)	H (m)	L(m)	P(m)	(Lts/seg)	H1 (m)	L1(m)	P1(m)	(Lts/seg)	H2 (m)	L2(m)	P2(m)	a(m)	b(m)	h(m)
400	0.35	1.15	1.05	200	0.27	0.85	0.80	200	0.27	0.85	0.80	2.65	3.45	1.50
380	0.35	1.10	1.05	190	0.26	0.85	0.80	190	0.26	0.85	0.80	2.60	3.40	1.50
360	0.33	1.10	1.00	180	0.25	0.85	0.75	180	0.25	0.85	0.75	2.55	3.30	1.45
340	0.33	1.05	1.00	170	0.25	0.80	0.75	170	0.25	0.80	0.75	2.50	3.25	1.45
320	0.33	1.00	1.00	160	0.24	0.80	0.75	160	0.24	0.80	0.75	2.45	3.20	1.45
300	0.30	1.10	0.90	150	0.24	0.75	0.75	150	0.24	0.75	0.75	2.40	3.10	1.30
280	0.30	1.00	0.90	140	0.23	0.75	0.70	140	0.23	0.75	0.70	2.35	3.00	1.30
260	0.30	0.95	0.90	130	0.22	0.75	0.65	130	0.22	0.75	0.65	2.25	2.95	1.30
240	0.28	0.95	0.85	120	0.22	0.70	0.65	120	0.22	0.70	0.65	2.20	2.85	1.25
220	0.28	0.90	0.85	110	0.20	0.70	0.60	110	0.20	0.70	0.60	2.15	2.75	1.25
200	0.27	0.85	0.80	100	0.20	0.65	0.60	100	0.20	0.65	0.60	2.05	2.65	1.20
180	0.25	0.85	0.75	90	0.20	0.60	0.60	90	0.20	0.60	0.60	2.00	2.55	1.10
160	0.24	0.80	0.75	80	0.18	0.60	0.55	80	0.18	0.60	0.55	1.90	2.45	1.10
140	0.23	0.75	0.70	70	0.17	0.60	0.50	70	0.17	0.60	0.50	1.80	2.35	1.05
120	0.22	0.70	0.70	60	0.16	0.55	0.50	60	0.16	0.55	0.50	1.70	2.20	1.00
100	0.20	0.65	0.60	50	0.15	0.50	0.45	50	0.15	0.50	0.45	1.60	2.05	0.90
80	0.18	0.60	0.55	40	0.14	0.45	0.45	40	0.14	0.45	0.45	1.50	1.90	0.85
60	0.16	0.55	0.50	30	0.12	0.45	0.40	30	0.12	0.45	0.40	1.35	1.70	0.75
40	0.14	0.45	0.45	20	0.11	0.35	0.35	20	0.11	0.35	0.35	1.20	1.50	0.70
20	0.10	0.40	0.30	10	0.08	0.30	0.25	10	0.08	0.30	0.25	0.95	1.20	0.50

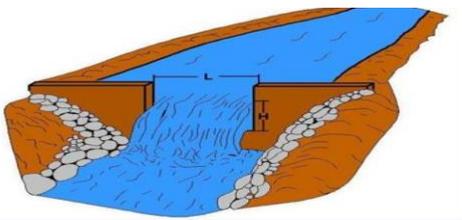
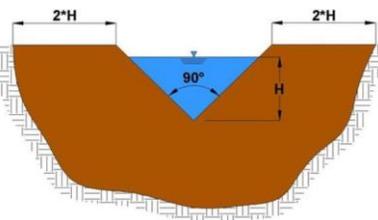
TANQUE REPARTIDOR DE CAUDAL



a= Ancho del tanque repartidor en [m].
 b= Largo del tanque repartidor en [m].
 h= altura total del tanque [m].

VERTEDEROS DE PARED DELGADA

VERTEDEROS								
CAUDAL	CARGA HIDRAULICA	VERTEDERO RECTANGULAR			CARGA HIDRAULICA	VERTEDERO TRIANGULAR		
(Lts/seg)	H (m)	L(m)	P(m)	3H	H (m)	L(m)	P(m)	2H
400	0.35	1.15	1.05	1.05	0.242	0.68	0.10	0.50
380	0.35	1.10	1.05	1.05	0.237	0.67	0.10	0.50
360	0.33	1.10	1.00	1.00	0.232	0.66	0.10	0.50
340	0.33	1.05	1.00	1.00	0.227	0.65	0.10	0.50
320	0.33	1.00	1.00	1.00	0.222	0.64	0.10	0.40
300	0.30	1.10	0.90	0.90	0.216	0.63	0.10	0.40
280	0.30	1.00	0.90	0.90	0.210	0.62	0.10	0.40
260	0.30	0.95	0.90	0.90	0.205	0.61	0.10	0.40
240	0.28	0.95	0.85	0.85	0.198	0.60	0.10	0.40
220	0.28	0.90	0.85	0.85	0.191	0.58	0.10	0.40
200	0.27	0.85	0.80	0.80	0.184	0.57	0.10	0.40
180	0.25	0.85	0.75	0.75	0.177	0.55	0.10	0.40
160	0.24	0.80	0.75	0.75	0.169	0.54	0.10	0.30
140	0.23	0.75	0.70	0.70	0.160	0.52	0.10	0.30
120	0.22	0.70	0.70	0.70	0.150	0.50	0.10	0.30
100	0.20	0.65	0.60	0.60	0.140	0.48	0.10	0.30
80	0.18	0.60	0.55	0.55	0.128	0.46	0.10	0.30
60	0.16	0.55	0.50	0.50	0.114	0.43	0.10	0.20
40	0.14	0.45	0.45	0.45	0.097	0.39	0.10	0.20
20	0.10	0.40	0.30	0.30	0.07	0.34	0.10	0.10

VERTEDERO RECTANGULAR	VERTEDERO TRIANGULAR
	
<p>Contracciones n= 2</p> <p>Borde libre Bl = 0.10 m</p>	<p>Umbral P= 0.10 m</p> <p>Borde libre Bl = 0.10 m</p>