

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA  
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Aplicación que agilice los cálculos, análisis y modelación en la confección de un  
diseño hidráulico a partir del mejoramiento del sistema ya empleado por SENARA, con la  
finalidad de ser utilizado en la dirección regional Pacífico Central de esta entidad en el periodo  
2021.

Iván Gerardo Quirós Angulo

CARTAGO, 2021



# Licencia escogida

## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional



---

Esta no es una Licencia de Cultura Libre.

---



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](#) .

***Trabajo Final de Graduación  
Acta de Calificación***

(Según Art. 22 Reglamento interno de Trabajos Finales de Graduación)

Estudiante:	
Carné:	
Trabajo de Graduación:	

**Nota Final**

	Nota	Porcentaje	Puntaje
Asesor de la Escuela de Ingeniería Agrícola		<b>X 0,6</b>	
Tribunal Evaluador		<b>X 0,4</b>	
<b>NOTA FINAL</b>			
Comentarios			
Nombre del Asesor (a) de la Escuela	Firma <b>FERNANDO WATSON HERNANDEZ (FIRMA)</b> <small>Firmado digitalmente por FERNANDO WATSON HERNANDEZ (FIRMA) Fecha: 2021.11.23 12:13:29 -06'00'</small>		
Nombre del Lector (a)	Firma <b>SERGIO FABIAN ARRIETA QUESADA (FIRMA)</b> <small>Firmado digitalmente por SERGIO FABIAN ARRIETA QUESADA (FIRMA) Fecha: 2021.11.23 12:16:49 -06'00'</small>		
Nombre del presidente (a)	Firma <b>LAURA PATRICIA SEGURA SERRANO (FIRMA)</b> <small>Firmado digitalmente por LAURA PATRICIA SEGURA SERRANO (FIRMA) Fecha: 2021.11.25 11:10:29 -06'00'</small>		

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermano por haberme apoyado y motivado en los momentos más difíciles y especialmente a mi compañera de vida por la ayuda incondicional de principio a fin en esta aventura.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	RESUMEN .....	viii
2	INTRODUCCIÓN .....	1
3	OBJETIVOS .....	4
3.1	Objetivo general .....	5
3.2	Objetivos específicos .....	5
4	REVISIÓN DE LITERATURA .....	6
4.1	Red hidráulica .....	7
4.2	Ámbito nacional e internacional .....	9
4.3	Perfil topográfico .....	10
4.4	Diámetro de la tubería y velocidad del fluido .....	11
4.5	Pérdidas de carga.....	12
4.5.1.	Hazen Williams.....	12
4.5.2.	Darcy Weisbach.....	13
4.6	Línea piezométrica .....	14
4.7	Carga dinámica y estática.....	15
4.8	Cédula y diámetro comercial .....	16
4.8.1.	Costo de tuberías.....	17
4.9	Celeridad .....	17
4.9.1.	Método simplificado y método completo .....	17
4.10	Golpe de ariete.....	18
4.11	Accesorios .....	19
4.11.1.	Válvulas.....	20
4.11.2.	Filtrado .....	21

4.11.3.	Tanques quiebra gradiente y de almacenamiento .....	21
4.11.4.	Bombas.....	21
4.11.5.	Piezas especiales .....	22
4.12	Epanet .....	22
5	METODOLOGÍA.....	23
5.1	Datos iniciales .....	25
5.2	Longitud entre puntos .....	25
5.3	Estacionamiento .....	25
5.4	Distancia horizontal .....	26
5.5	Perfil topográfico .....	26
5.6	Asignación de caudal y carga para las tomas.....	27
5.7	Caudal total del sistema .....	27
5.8	Determinar el diámetro teórico .....	27
5.9	Pérdidas generadas .....	28
5.9.1.	Hazen Williams.....	28
5.9.2.	Darcy Weisbach.....	29
5.10	Calcular y representar la línea piezométrica .....	29
5.11	Carga dinámica y estática.....	30
5.12	Seleccionar cédula y diámetro comercial .....	30
5.13	Margen de seguridad .....	31
5.14	Modificaciones con accesorios.....	31
5.15	Celeridad.....	31
5.15.1.	Método completo .....	31
5.15.2.	Método simplificado .....	32

5.16	Golpe de ariete.....	32
5.17	Presión total del sistema y sobrepresión.....	33
5.18	Reporte y presupuesto .....	33
5.19	Modelación en Epanet .....	34
5.20	Estudio de caso .....	34
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
6.1	Agregar datos topográficos a la aplicación .....	36
6.2	Longitud entre puntos, estacionamiento y distancia horizontal.....	36
6.3	Perfil topográfico .....	37
6.4	Caudal total del sistema .....	37
6.5	Pérdidas generadas .....	39
6.5.1.	Hazen Williams.....	39
6.6	Línea piezométrica y representación gráfica.....	40
6.7	Carga dinámica y estática.....	42
6.8	Selección de tuberías.....	43
6.8.1.	Cédula y margen de seguridad.....	43
6.8.2.	Diámetro comercial.....	46
6.9	Recalculo con valores de tubería comerciales .....	47
6.10	Modificación y asignación de los accesorios .....	49
6.11	Golpe de ariete.....	49
6.12	Presión total y sobrepresión.....	50
6.13	Reporte de tuberías y presupuesto.....	51
6.14	Modelación .....	52
6.15	Ventajas de la aplicación sobre el sistema actual .....	52

6.15.1.	Bloqueo de celdas .....	52
6.15.2.	Caudal total, Asignación de caudal y carga para las tomas .....	52
6.15.3.	Calcular las pérdidas con Darcy Weisbach .....	52
6.15.4.	Base de datos .....	53
6.15.5.	Selección de tuberías y diámetro utilizado.....	53
6.15.6.	Accesorios .....	53
6.15.7.	Golpe de ariete .....	54
6.16	Manual de usuario .....	54
6.16.1.	Menú principal .....	54
6.16.2.	Base de datos.....	55
6.16.3.	Parámetros para el diseño hidráulico .....	57
6.16.4.	Caudal necesario, carga de toma y caudal total .....	58
6.16.5.	Carga inicial .....	59
6.16.6.	Margen de seguridad .....	60
6.16.7.	Manipulación del diseño con accesorios.....	60
6.16.8.	Exportar a Epanet.....	61
6.16.9.	Perfil topográfico .....	62
6.16.10.	Reporte de materiales y costos.....	62
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	64
7.1	Conclusiones .....	65
7.2	Recomendaciones.....	65
8	Bibliografía .....	67
9	ANEXOS .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Red hidráulica. ....	7
<b>Figura 2.</b> Representación de un perfil topográfico. ....	11
<b>Figura 3.</b> Fluido a través de válvulas. ....	12
<b>Figura 4.</b> Línea piezométrica a través de un trayecto. ....	15
<b>Figura 5.</b> Representación de la carga dinámica y estática de un proyecto. ....	15
<b>Figura 6.</b> Inicio del golpe de ariete. ....	19
<b>Figura 7.</b> Daños por golpe de ariete. ....	19
<b>Figura 8.</b> Diagrama para el desarrollo de la aplicación. ....	24
<b>Figura 9.</b> Perfil topográfico del trayecto Ojo de Agua Puntarenas. ....	34
<b>Figura 10.</b> Perfil topográfico. ....	37
<b>Figura 11.</b> Representación de la línea piezométrica. ....	42
<b>Figura 12.</b> Diferentes tuberías contenidas en la base de datos. ....	44
<b>Figura 13.</b> Reporte de tuberías del tramo del proyecto. ....	51
<b>Figura 14.</b> Orden necesario del levantamiento topográfico. ....	54
<b>Figura 15.</b> Menú principal. ....	55
<b>Figura 16.</b> Ingreso de información en la base de datos para los métodos de cálculo de pérdidas. .....	56
<b>Figura 17.</b> Ingreso de información en la base de datos sobre las tuberías comerciales. ....	56
<b>Figura 18.</b> Parámetros para el diseño hidráulico. ....	58
<b>Figura 19.</b> Asignar margen de seguridad. ....	60
<b>Figura 20.</b> Asignar accesorios al sistema. ....	60
<b>Figura 21.</b> Botón de exportar. ....	61

<b>Figura 22.</b> Ventana de búsqueda.....	62
<b>Figura 23.</b> Perfil generado por medio de la aplicación.....	62
<b>Figura 24.</b> Reporte generado a través de la aplicación.....	63

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> <i>Coefficiente de Hazen Williams para distintos materiales.</i> .....	13
<b>Cuadro 2.</b> <i>Coefficiente de Darcy-Weisbach para distintos materiales.</i> .....	14
<b>Cuadro 3.</b> <i>Módulos de elasticidad de diferentes materiales y también su coeficiente.</i> .....	18
<b>Cuadro 4.</b> <i>Cálculo de longitud entre puntos, estacionamiento y distancia horizontal.</i> .....	36
<b>Cuadro 5.</b> <i>Longitud, estacionamiento y distancia horizontal del trayecto del proyecto.</i> .....	37
<b>Cuadro 6.</b> <i>Caudal total del sistema.</i> .....	38
<b>Cuadro 7.</b> <i>Caudal de la sección del proyecto Ojo de agua.</i> .....	38
<b>Cuadro 8.</b> <i>Pérdidas generadas por método Hazen Williams.</i> .....	39
<b>Cuadro 9.</b> <i>Pérdidas por método de Hazen Williams en sistema actual.</i> .....	40
<b>Cuadro 10.</b> <i>Línea piezométrica.</i> .....	41
<b>Cuadro 11.</b> <i>Línea piezométrica en el sistema actual.</i> .....	41
<b>Cuadro 12.</b> <i>Cálculo de carga dinámica y estática por medio de la aplicación.</i> .....	42
<b>Cuadro 13.</b> <i>Cálculo de carga dinámica y estática con el sistema actual.</i> .....	43
<b>Cuadro 14.</b> <i>Selección de cédula de la tubería por medio de la aplicación.</i> .....	45
<b>Cuadro 15.</b> <i>Selección de cédula con el sistema actual.</i> .....	45
<b>Cuadro 16.</b> <i>Selección de diámetro de la tubería por medio de la aplicación.</i> .....	46
<b>Cuadro 17.</b> <i>Selección de diámetro con el sistema actual.</i> .....	47
<b>Cuadro 18.</b> <i>Cálculo de la velocidad por medio de la aplicación.</i> .....	48

<b>Cuadro 19.</b> <i>Cálculo de la velocidad por medio del sistema actual.</i> .....	48
<b>Cuadro 20.</b> <i>Modificación hidráulica con válvula reguladora.</i> .....	49
<b>Cuadro 21.</b> <i>Cálculo del golpe de ariete en los diferentes puntos.</i> .....	50
<b>Cuadro 22.</b> <i>Estimación de presión total.</i> .....	50
<b>Cuadro 23.</b> <i>Asignar un caudal extra al sistema.</i> .....	59
<b>Cuadro 24.</b> <i>Asignar carga inicial.</i> .....	59

# **1 RESUMEN**

La aplicación busca facilitar y agilizar la creación de diseños hidráulicos en sistemas a presión. Esta se basa en una hoja de cálculo realizada por funcionarios de SENARA departamento de la región pacifico central Esparza, el sistema actual utilizado por este departamento es una hoja de cálculo donde se carga las condiciones topográficas, se realizan los cálculos pertinentes para finalmente realizar una elección de tuberías que satisfagan las restricciones y requisitos que el ingeniero establece. A partir de estos requerimientos el desarrollo de la aplicación migra estos parámetros a un lenguaje de programación en Visualbasic.net, sumando funciones como la posibilidad de calcular las pérdidas generadas por el rozamiento por más de un método, determinar la magnitud del golpe de ariete contemplando ambas formas de cálculo de celeridad, con la intención de generar resultados más apegados a la realidad de lo que podría suceder en el funcionamiento del sistema y de esta manera realizar una selección acertada de las tuberías según las necesidades.

Palabras clave: carga dinámica, carga estática, cédula, celeridad, golpe de ariete.

## **Abstract**

The application seeks to facilitate and speed up the creation of hydraulic designs in pressure systems. This is based on a calculation sheet made by officials of SENARA department of Esparza, the current system used by this department is a spreadsheet where the topographic conditions are loaded, the pertinent calculations are made to finally make a choice of pipes that satisfy the restrictions and requirements that the engineer establishes. From these requirements, the development of the application migrates these parameters to a programming language in Visualbasic.net, adding functions such as the possibility of calculating the losses generated by friction by more than one method, determining the magnitude of the water hammer considering both forms of speed calculation, with the intention of generating results that are closer to the reality of what could happen in the operation of the system and in this way make a correct selection of the pipes according to the needs.

## **Keywords**

water hammer, static load, dynamic load, schedule, celerity.

## **2 INTRODUCCIÓN**

Una de las funciones del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), es el desarrollo de proyectos de sistemas hidráulicos para el beneficio de pobladores, los cuales cuentan con la necesidad de obtener el recurso hídrico para consumo propio o requerimientos agrícolas, la mayoría de proyectos buscan la reducción de costos y mantenimiento, por lo cual gran parte se ejecutan sin ningún sistema que aporte energía al sistema hidráulico, más allá de la adaptación a la topografía para la obtención de energía (SCIJ, 2017).

El desarrollo de estos proyectos se basa en el levantamiento topográfico secuencial de puntos, donde está previsto el trazo de la tubería. Uno de los principales impedimentos para la ejecución de proyectos con mayor brevedad, aparte de la aprobación legal y económica, es la comprobación que el sistema hidráulico cumple con las necesidades por las cuales está naciendo realmente el proyecto. Un diseño de red de tubería contempla una serie de parámetros hidráulicos para la determinación del diámetro comercial y espesor en el caso de la tubería y de accesorios que regulen o manipulen el sistema para el correcto funcionamiento (Franquet, 2019).

La serie de cálculos necesarios para la obtención de datos precisos y fiables bajo parámetros de velocidad y presiones máximas conlleva un lapso extenso, máxime si es un proyecto de una distancia considerable, pudiendo incurrir en errores. Actualmente en el departamento de SENARA en el Pacífico Central, se busca mejorar una herramienta tecnológica que agilice el proceso de cálculo y de estimación, para que el usuario tenga mayor tiempo disponible para el análisis de estos resultados y posibles modificaciones que mejoren el sistema, además de exportación de esos datos a un programa de modelación hidráulica que haga de una forma más gráfica las situaciones que podría pasar en cada tramo de la conducción (Arnalich, 2021).

Actualmente en la institución se utiliza una hoja de cálculo que se ha extendido a diferentes departamentos, pues se encontró que la estimación de datos se facilitaba y tuvo éxito en el objetivo buscado, sin embargo, se enfrentó a diversas problemáticas como la agilización de procesos, utilización de parámetros, inclusión de fenómenos físicos, interfaz con un manejo

amigable y la capacidad de exportar los resultados para la modelación en aplicaciones de terceros.

Con base a lo mencionado el proyecto a desarrollar es una aplicación en un lenguaje de programación en VisualBasic.Net el cual permita realizar los cálculos pertinentes, análisis, variaciones debido a la agregación de accesorios como válvulas, presupuesto, lista de materiales y la exportación de los datos a un programa de modelación Epanet 2.0 el cual es un código libre, con el fin de brindar una herramienta de uso gratuito en el ámbito de Ingeniería Agrícola en el aspecto académico, laboral y social por el impacto de las labores de SENARA; facilitando el cálculo y análisis de los proyectos.

La selección del lenguaje de programación se debe a las cualidades que presenta, ya que benefician el desarrollo del proyecto, Visualbasic.Net, el cual es aprovechable debido a la compatibilidad con el lenguaje empleado por Microsoft office, además de que los levantamientos topográficos se almacenan en este tipo de documentos, siendo un lenguaje ligero que busca facilitar la ejecución de los datos en la unidad de procesamiento del computador, lo que otorga el beneficio de la compatibilidad en un ordenador con sistema operativo Windows con especificaciones de hardware mínimas (Putier, 2015).

### **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo general**

Crear una aplicación que agilice los cálculos, análisis y modelación en la confección de un diseño hidráulico a partir del mejoramiento del sistema ya empleado por SENARA, con la finalidad de ser utilizado en la dirección regional Pacífico Central de esta entidad en el periodo 2021.

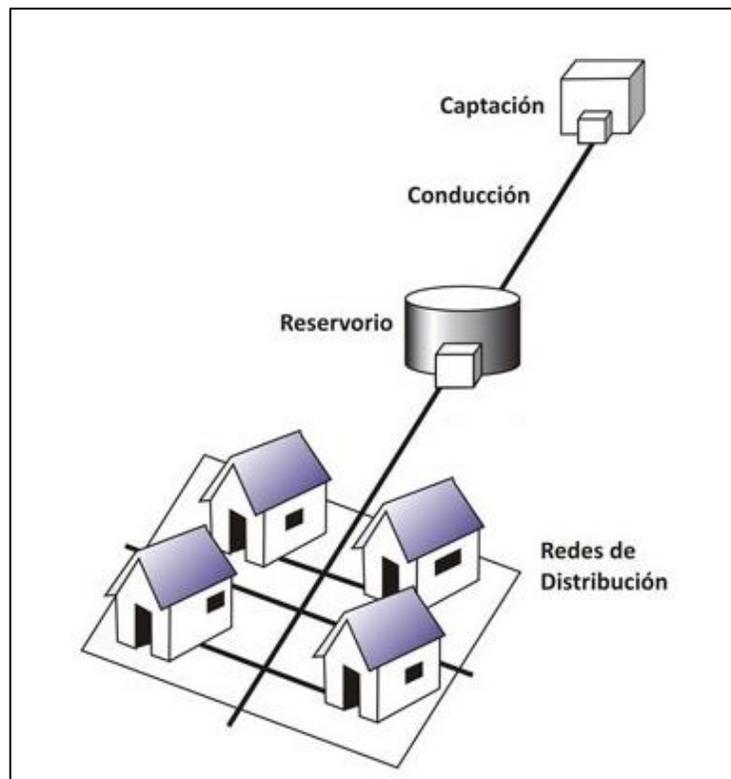
### **3.2 Objetivos específicos**

- Crear módulos que entreguen información topográfica procesada, la lista de materiales, la interpretación espacial y una proyección general del costo, expresado en un archivo de exportación interpretable para Epanet 2.2.
- Establecer un módulo de cálculo del fenómeno de golpe de ariete que oriente al usuario a tomar la elección adecuada de la cédula de las tuberías, lo cual sea representado en una lista de materiales.
- Diseñar un manual de usuario para interpretación de las funciones diferenciadas que contiene la aplicación a comparación del sistema actual utilizado por SENARA

## **4 REVISIÓN DE LITERATURA**

#### 4.1 Red hidráulica

Una red hidráulica para el transporte de agua es una serie de tuberías y accesorios acoplados que sirven como medio para el traslado de este líquido a presión de un punto a otro como lo muestra la figura 1, su cometido es abastecer del recurso a los interesados del proyecto para el consumo doméstico, comercial o agrícola (CONAGUA, 2016).



**Figura 1.** Red hidráulica.

Fuente: CONAGUA (2016)

El proceso para la realización de un proyecto con estas características comienza con la recolección de datos con respecto a la cantidad de agua necesaria para poder abastecer a los beneficiarios y además las características que debe cumplir como la presión en las tomas o la calidad del agua, con el fin de determinar un caudal total que debe ser suministrado por una o varias fuentes, posteriormente valorar si el caudal aprovechable que se tiene en la fuente cubre

las necesidades del proyecto o se tiene que recurrir a otra fuente (Sánchez, Castañón, & Gil, 2017).

Un levantamiento topográfico traza la posible ruta en la que se va a diseñar la tubería de conducción, este aspecto es clave debido a que puede encarecer considerablemente el proyecto, muchos de estos diseños que se realizan en el país busca reducir los costos considerablemente debido a que están enfocados para beneficiar a PYMES o sectores de población que no pueden costearlo, en el caso de SENARA tienen como objetivo desarrollar proyectos donde no sea necesario utilizar bombas o aparatos que aporten energía al sistema siempre que sea posible y solamente trabajar con la carga ganada a través de la gravedad, ya que esto encarece el proyecto por el consumo energético, el accesorio como tal, el mantenimiento y la protección que este conlleve (SENARA, 1983).

El levantamiento topográfico es la base para comenzar a diseñar y poder generar varias propuestas que contemplen diferentes costos y características, este levantamiento está plasmado en su mayoría de ocasiones en una hoja de cálculo en diferentes terminologías que consta de cuatro columnas, donde una de ellas describe el punto y las restante muestra la información de la longitud, latitud y elevación, con esta información se puede conocer la distancias entre puntos, distancia total y la distancia horizontal (Sánchez, Castañón, & Gil, 2017).

El estudio de la calidad del agua es relevante para prevenir accidentes y fallos, dado que estos proyectos buscan abastecer sistemas de riego en los cuales se puede generar problemas de obstrucción si el agua arrastra partículas de mayor diámetro permitido por los accesorios, la calidad del agua puede generar variaciones en los fenómenos como el golpe de ariete el cual lo puede agravar y generar graves daños (Jiménez, 2013).

Los proyectos que están enfocados abastecer una población que utilizará el recurso hídrico de forma doméstica, se prevé un margen en el crecimiento de la población a una cierta de cantidad de años, esto debido a que el caudal necesario aumenta como a su vez también incrementa los diámetros de las tuberías, para este aspecto juega un papel clave un equilibrio

económico donde se pueda satisfacer las necesidades hídricas de forma actual, pensando a futuro y sin comprometer la funcionalidad y la seguridad con la elección de las tuberías y accesorios (Jiménez, 2013).

## **4.2    Ámbito nacional e internacional**

En el ámbito internacional la búsqueda de la simplificación en el proceso de toma de datos y obtener resultados a provocado que entes comerciales y académicos producir herramientas que aceleren el proceso de cálculo y diseño para generar una o varias propuestas en un menor tiempo posible y repercutir de forma negativa en el desarrollo del proyecto (Solís, 2021).

Para el entorno de obras civiles del país de México se crea una herramienta con nombre Epaex con la función de exportar datos hacia la aplicación Epanet por medio de un documento compatible, esta herramienta es una hoja de cálculo de Excel que presenta macros, permite el traslado de la información generada en los cálculos para el diseño hidráulico, también de las características topográficas, tuberías, accesorios y todas las particularidades que rigen el proyecto (Tandazo, 2012). Es una herramienta que agiliza poder tener una simulación en un plazo menor, pero con la falencia que la sección de cálculo y diseño de la obra aún es un proceso manual.

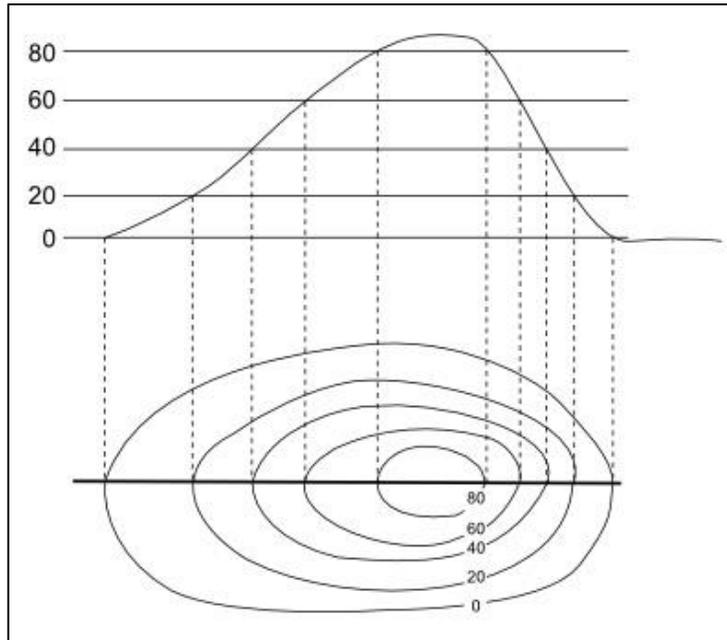
En la región de Valencia España, la Universidad Politécnica de Valencia desarrolló un software que sirve como conexión entre las aplicaciones de diseño del paquete CAD hacia Epanet, este software recibe el nombre de Epacad. Tiene como función exportar el diseño bidimensional desarrollado en el paquete CAD con las características espaciales para los puntos y las longitudes de las líneas que se interpreta por Epanet como tubería, de esta forma se puede tener el planteamiento del diseño de una forma rápida, pero no así su ejecución (UPV, 2017). Este software presenta como falencia los pocos datos que son exportados hacia Epanet, es necesario agregar de forma manual aspectos del relieve y todos los parámetros hidráulicos del mismo lo que termina provocando una gran demora para poder ejecutarlo.

En el ámbito nacional también existe la necesidad de agilizar el proceso de cálculos y modelación de las redes hidráulicas, de igual forma lo que se busca internacionalmente es renovar el proceso manual para completar el diseño de una obra. En el departamento de SENARA en la región de Esparza se crea una hoja de cálculo basada en Excel la cual haga de forma automática los cálculos para la generación del diseño hidráulico, esta hoja presenta macros para ser más intuitivo el proceso, se puede plantear las necesidades de presión y caudales para todas las tomas, además permite ciertas modificaciones en los cálculos a través de accesorios, todo esto hace que se agilice la creación de diferentes propuestas. (Solís, 2021). Esta herramienta acelera el proceso de obtención de un diseño hidráulico, pero carece de algunos parámetros relevantes para la elección de tuberías como lo es el golpe de ariete, también falta una función de poder exportar de forma simple los datos algún programa de simulación de redes hidráulicas.

En la actualidad se ha reinventado el proceso de desarrollo de un diseño hidráulico adaptándose y aprovechando las nuevas tecnologías, pero es necesario poder reducir el tiempo que demora para realizar uno o varios diseños para un proyecto, el tiempo debe utilizarse para analizar y simular el mismo para determinar la mejor opción, de esta manera entorpecer lo menos posible y asegurar el funcionamiento óptimo del proyecto, esto se puede lograr sistematizando todo el proceso de cálculo, agregando nuevos parámetros para la elección final de la tubería y exportando de una forma simple hacia Epanet (Solís, 2021).

### **4.3 Perfil topográfico**

Es una representación de forma gráfica del terreno en un plano vertical donde se combina la elevación de cada punto en el eje de las ordenadas con la distancia horizontal que se representa en el eje de las abscisas como se muestra en la figura 2, este perfil permite comprender de una forma más sencilla las elevaciones y depresiones que debe sobrellevar la red hidráulica, también es una manera ágil de determinar si es posible que el agua pueda llegar al final del recorrido (Corral, 2009) .



**Figura 2.** Representación de un perfil topográfico.

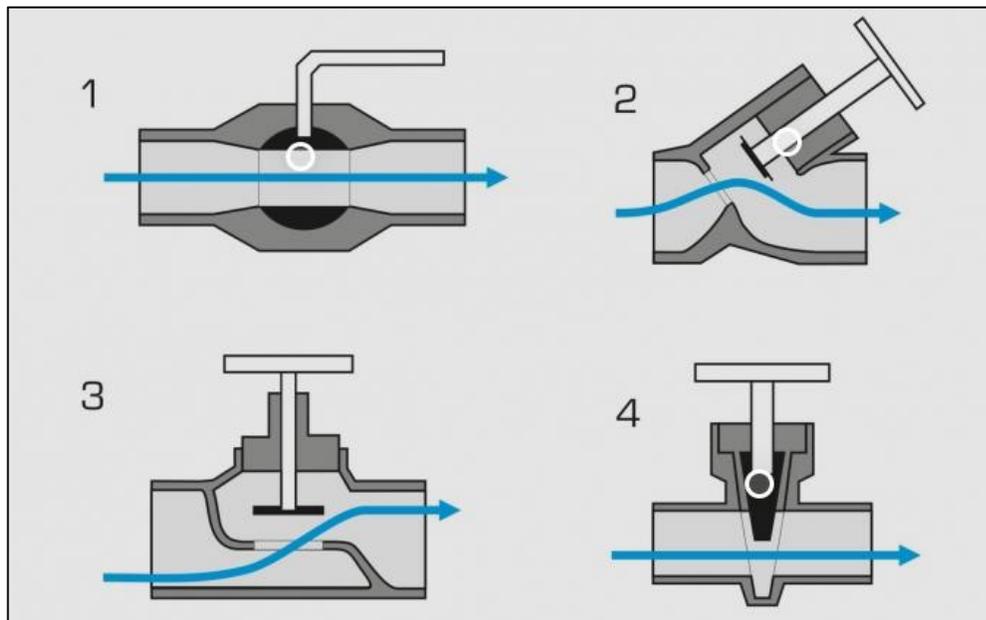
Fuente: Corral (2009)

#### **4.4 Diámetro de la tubería y velocidad del fluido**

Para determinar el diámetro de las tuberías en los diferentes tramos del recorrido se basa el conocimiento previo de caudal necesario a transportar, delimitado en la velocidad máxima que se quiere hacer funcionar el sistema, esto debido a que las velocidades altas en una red hidráulica superiores al rango de 1,5m/s a 2m/s ocasionan desgaste prematuro en las tuberías y accesorios, posibilidad de golpe de ariete lo que puede generar implosión o explosión de las tuberías (Nieto, 2015).

## 4.5 Pérdidas de carga

La pérdida de carga en tuberías es la reducción de presión en la tubería la cual se obtiene por la gravedad o por algún implemento que aporte carga como una bomba, se genera por la fricción que existe entre las partículas del fluido y las paredes del conducto o los accesorios como válvulas, estrechamientos o curvas como se muestra en la Figura 3. Para que exista pérdidas de carga debe existir circulación del fluido, las condiciones en conjunto que generan pérdidas de carga puede ser el tipo de fluido que se transporta, el caudal, la velocidad y la rugosidad del conductor (Ribot & Nacenta, 2017).



**Figura 3.** *Fluido a través de válvulas.*

Fuente: Ribot & Nacenta (2017)

### 4.5.1. Hazen Williams

La ecuación de Hazen Williams es usual encontrarla en los procesos de diseño de sistemas a presión debido a la simplicidad y resultados acertados que se obtienen sobre todo en tuberías plásticas como PE y PVC), esta ecuación toma un coeficiente de fricción que depende

del material a utilizar los cuales se muestran en el cuadro 1, como también el tiempo de uso que lleva la tubería. Los límites en los que se ha tenido un éxito en los proyectos son bajo temperaturas en el rango de 5 °C - 25 °C y con diámetros de tubería entre los 0.05m a 1.85m (Alegret & Martínez, 2019).

**Cuadro 1.** *Coefficiente de Hazen Williams para distintos materiales.*

<b>Material</b>	<b>C</b>
asbesto cemento	140
Hierro fundido nuevo	130
hierro fundido, 10 años	107-113
hierro fundido, 20 años	89-100
hierro fundido, 30 años	75-90
hierro fundido, 40 años	64-83
concreto	120-140
cobre	130-140
Hierro dúctil	120
Hierro galvanizado	120
Plástico (PE, PVC)	140-150
Tubería lisa nueva	140
Acero nuevo	140-150
Acero	130
Acero rolado	110
Hormigón	120-140

*Fuente:* (Alegret & Martínez, 2019)

#### **4.5.2. Darcy Weisbach**

Esta ecuación se considera como universal debido a la precisión y la posibilidad de trabajar con más fluidos aparte del agua, de igual forma esta ecuación contempla un factor de

fricción que depende del material y el estado de la tubería el cual se muestra en el cuadro 2, los rangos de diámetros y temperaturas son más amplios, lo que permite ser utilizada en un algún lugar donde se presenta condiciones más extremas (Méndez, 2007).

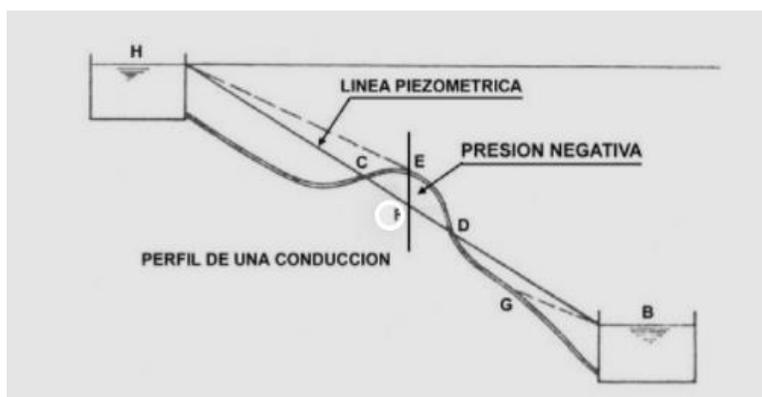
**Cuadro 2.** *Coefficiente de Darcy-Weisbach para distintos materiales.*

<b>Material</b>	<b>f(mm)</b>
Plástico (PE, PVC)	0.0015
Fundición	0.12-0.60
Acero comercial y soldado	0.03-0.09
Hierro forjado	0.03-0.09
Hierro galvanizado	0.06-0.24
Tubo estirado de acero	0.0024
Hormigón	0.3-3.0

*Fuente: (Méndez, 2007)*

#### 4.6 Línea piezométrica

Es una línea que supone hasta donde podría llegar el ascenso del fluido contemplando la topografía y los diferentes accesorios que suman o restan en la carga que afecta directamente en la elevación que podría tener como se ve en la Figura 4, inicialmente puede arrancar con la misma cota del primer punto o también con una suma a esta elevación para aumentar la carga por necesidades específicas como es el caso de los tanques aéreos (Luszczewski, 2012).



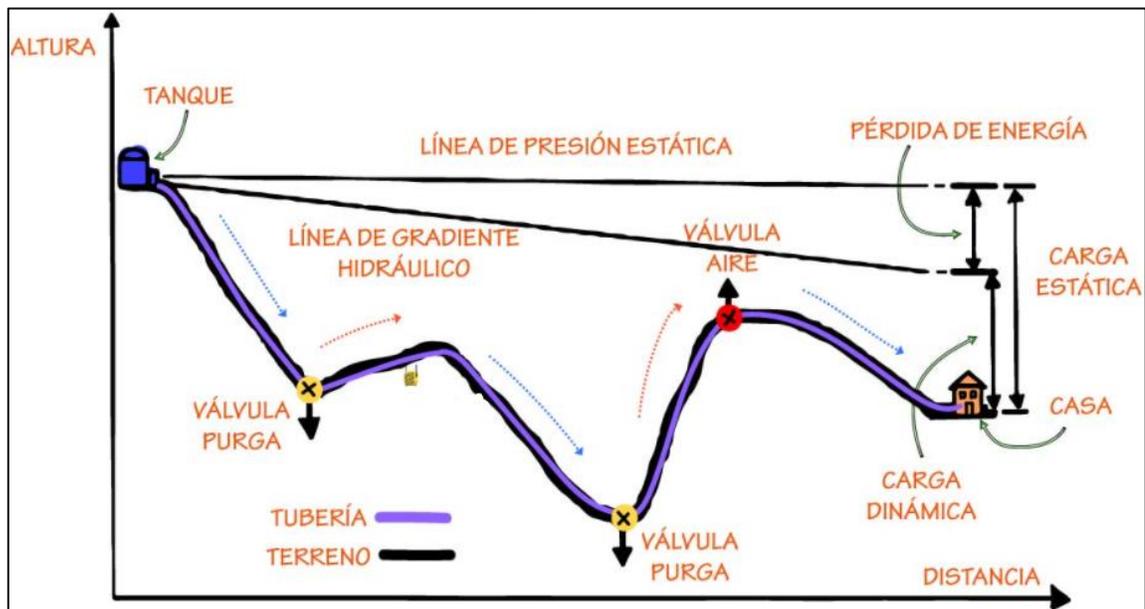
**Figura 4.** Línea piezométrica a través de un trayecto.

Fuente: Luszczewski (2012)

#### 4.7 Carga dinámica y estática

La carga dinámica es la diferencia que existe entre la línea piezométrica y la elevación del punto en cuestión, dando como resultado la carga disponible en ese punto como se denota en la figura 5, pero no de forma acumulativa, se ve afectado por las variaciones en el relieve (Corcho & Duque, 2005).

La carga estática es la acumulación de presión a lo largo de la tubería mostrado en cada punto como se evidencia en la figura 5, es un rubro que se ve afectado por el relieve del terreno y tiene como funcionalidad representar un valor de presión con el fin de estimar el tipo de cédula que es necesario para la tubería o también conocer en qué puntos de la red se tiene una baja o alta carga y es necesario modificarse (Corcho & Duque, 2005).



**Figura 5.** Representación de la carga dinámica y estática de un proyecto.

Fuente: Corcho & Duque (2005).

#### **4.8 Cédula y diámetro comercial**

El termino cédula en las tuberías de conducción de fluidos hacen referencia a su grosor o espesor de pared, entre mayor sea el espesor incrementa su fuerza mecánica soportando presiones más elevadas, en el país como se muestra en el Anexo 1 se trabaja para este tipo de tuberías dos nomenclaturas SDR y SCH, el primero significa por sus siglas en inglés “Standar Dimension Ratio” y es una relación del diámetro nominal de la tubería con el espesor de las misma, el segundo es un acrónimo de la palabra “ Schedule” es una relación de la presión diseñada con la tensión admisible (Nieto, 2010).

Para las tuberías con especificación SDR se aclara que entre menor sea el digito que acompañe esta abreviatura mayor será el espesor, caso contrario con SCH, para ambas situaciones tiene una presión máxima soportada y en la elección de la tubería entra en juego el factor seguridad con respecto al llevar a los limites cada tubería. En el comercio también existe dos tipos de tuberías que se adaptan a las necesidades del proyecto las cuales son cementadas y de empaque, esta última destaca por la movilidad que puede llegar a tener en condiciones de fenómenos sin presentar daños, caso contrario con la tubería cementada la cual presenta rigidez y es más propensa a sufrir daños (Nieto, 2010).

En Costa Rica la comercialización de tuberías se basa en dos datos para especificar cual se requiere, uno es el espesor que se precisa con la cédula y el segundo es el diámetro comercial, este se basa con respecto al diámetro nominal de la tubería como se muestra en el anexo 1 y el cual la mayoría de las ocasiones se menciona con unidades de pulgada. Actualmente hay algunos diámetros que no son comercializados en el país como es el caso de 5 pulgadas, también es importante recalcar que las empresas distribuidoras difícilmente dan la opción de vender tuberías a medida y de hacerlo eleva considerablemente el proyecto, lo cual deja únicamente la opción de adaptarse a los diámetros comercializados. El diámetro interno de la tubería se reduce

cuanto mayor espesor tenga la tubería, debido a que se mantiene el diámetro externo (Durman, 2021).

#### **4.8.1. Costo de tuberías**

El costo de una tubería está en función del diámetro y el espesor de pared, si alguno o ambos rubros aumenta de igual forma se incrementa el costo de la tubería como se muestra en el Anexo 2, también otro factor que hace que el costo cambie es el tipo de tubería si es cementada o de empaque. Para el caso de aparecer el símbolo “-” puede significar que ese tipo de tubería no existe en ese diámetro o no se tiene un precio establecido, debido a que se debe solicitar a la fábrica por no ser una tubería que normalmente se comercialice (Durman, 2021).

### **4.9 Celeridad**

Se establece que la celeridad es la velocidad que se tiene en la propagación de las ondas de presión en la tubería llena de un fluido, esta onda se origina por el golpe de ariete y depende del material donde este contenido el líquido, las características elásticas del líquido y de la composición del fluido (Toledo, 2009).

#### **4.9.1. Método simplificado y método completo**

La obtención de la celeridad contempla una serie de factores, uno de ellos es el módulo de elasticidad del material (E), un coeficiente que depende del material (k) ambos se muestran en el cuadro 3, también el módulo de elasticidad del fluido y además contempla la composición del fluido representado por la densidad, en este punto se puede generar dos criterios de cálculo, uno donde se toma como constante el valor de la densidad y elasticidad del fluido, se simplifica la obtención de la celeridad para el caso específico del agua con una densidad de  $1000\text{kg/m}^3$  y la elasticidad de  $2.03 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ; el otro criterio contempla todos los rubros anteriormente mencionados, lo cual hace que se determine valores más fiables, pero con la complicación de obtener más valores para poder desarrollar este cálculo (Toledo, 2009)

**Cuadro 3.** Módulos de elasticidad de diferentes materiales y también su coeficiente.

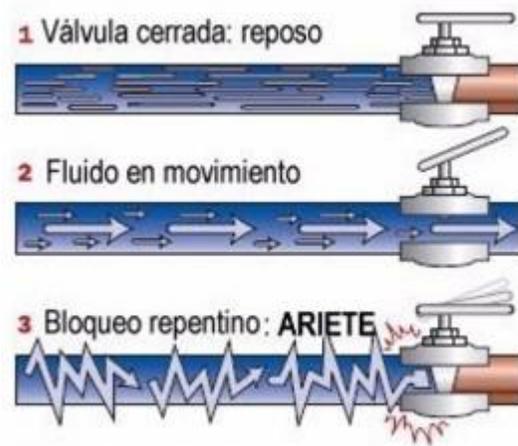
Material de la tubería	E (Kg/m <sup>2</sup> )	k (adimensional)
Hierro y acero	2x10 <sup>10</sup>	0,5
hierro fundido	1x10 <sup>10</sup>	1
Concreto (sin armar)	2x10 <sup>9</sup>	5
Fibrocimiento	1,85x10 <sup>9</sup>	5,5
PVC	3x10 <sup>8</sup>	33,3

*Fuente:* (Toledo, 2009)

#### 4.10 Golpe de ariete

El golpe de ariete es un fenómeno en el cual líquido choca con las paredes del conducto de forma violenta cuando el movimiento habitual es modificado de manera repentina. Este fenómeno provoca una sobrepresión o baja presión, esto precede según las acciones que sucedan en el sistema como cerrar o abrir de forma rápida una válvula el cual se ejemplifica en la Figura 6, movimiento de burbujas de aire en la tubería, arranque o interrupción de bombas, ondas en tanques elevados, la separación y recuentro de masas de agua y cambios de elevación del embalse (Toledo, 2009).

El golpe de ariete puede generar graves afectaciones tanto a las redes de abastecimiento o como también a las instalaciones hidráulicas de quienes reciben el líquido como se muestra en la figura 7, si se presenta en tuberías con una longitud y velocidades altas, debido que este fenómeno es directamente proporcional a estos factores. La prevención y seguridad contra este fenómeno inicia desde el diseño hidráulico estimándose con velocidades dentro el promedio adecuado, siempre estimar el golpe de ariete, mantener un margen de seguridad en las tuberías donde no quede justo la presión de trabajo con la presión máxima del conducto, además de instalar accesorios con la función de proteger la red hidráulica (Toledo, 2009).



**Figura 6.** Inicio del golpe de ariete.

Fuente: Toledo (2009)



**Figura 7.** Daños por golpe de ariete

Fuente: Toledo (2009)

#### 4.11 Accesorios

Una red hidráulica está compuesta por una serie de tuberías y también por una gran variedad de accesorios, muchos de estos funcionan de forma activa y pasiva, la categorización

se genera debido a que hay componentes que no siempre está cumpliendo la función y esto depende de las condiciones que se esté dando en el sistema (Blanca, Langa, & Tormo, 2014).

#### **4.11.1. Válvulas**

En la actualidad existe una gran cantidad de válvulas que cumplen una función más allá de cerrar o abrir paso al fluido, las válvulas regulan y protegen el sistema en casos extremos o en su funcionamiento normal, usualmente se utilizan válvulas de aire que tiene función la extracción de burbujas de aire en el sistema y se instalan como máximo cada 500m o después de cualquier cambio brusco de relieve, válvulas reguladoras de caudal tienen que objetivo manipular la cantidad del fluido (Escobar, 2009).

Las válvulas que tienen una influencia permanente en el sistema son las reguladoras de presión, existen para ambos sentidos del flujo, una válvula sostenedora de presión es necesaria cuando existe una toma en una depresión y esta evita que se pierda presión aguas arriba, también se utiliza antes de tanques quiebra gradientes o cualquier punto donde es crítico la pérdida de carga para el funcionamiento del sistema. Una válvula reductora de presión tiene la función de reducir la carga en el sistema y esto dependerá del fabricante, puede llegar hasta reducirse a un quinto de la presión., estas válvulas cumplen dos funciones relevantes en un sistema hidráulico, una de ellas y al igual que las válvulas anteriores protegen y velan por el correcto funcionamiento del sistema, pero como segunda función es reducir costos, si bien es cierto es una válvula que puede ser de un precio alto, al reducir la presión en la red se puede modificar el espesor de tubería lo cual hace que se obtenga un beneficio mayor, aún más si son diámetros elevados (Escobar, 2009).

Los proyectos desarrollados por SENARA departamento de Esparza, principalmente están regidos por procurar el funcionamiento a través de la ganancia de energía por medio de la gravedad sin agregar accesorios que sumen energía al sistema para su funcionamiento, debido a estos y las condiciones topográficas usualmente se utiliza válvulas reguladoras de presión, aire

y sostenedoras de presión, estas se pueden visualizar en el Anexo 3, también se puede presentar la combinación entre ellas (Solís, 2021).

#### **4.11.2. Filtrado**

Los sistemas de filtrado son esenciales para el correcto funcionamiento de los sistemas de riego, en el caso de usarse para enfoques agrícolas o también para reducir partículas de tamaños inapropiados para luego ser llevadas a plantas de saneamiento para el consumo humano, un filtro separa partículas de un tamaño igual o mayor al conveniente, si el sistema de filtrado no cuenta con una fuente de energía externa y solo con la suministrada por el mismo fluido es necesario una carga mínima en el sistema para el funcionamiento que esto dependerá del tipo de filtro y de igual forma genera pérdidas de carga punto a considerar para la ubicación del dispositivo (Sánchez, Latorre, & Díaz, 2011).

#### **4.11.3. Tanques quiebra gradiente y de almacenamiento**

Un tanque quiebra gradiente es un depósito para el agua sin sellar y de un volumen no muy grande que cumple la función de eliminar la presión acumulada en el sistema y aportar una carga mínima para no afectar el flujo posterior, siendo conveniente para reducir costos al tener menos presión y poder elegir una tubería con espesor menor. En el caso de un tanque de almacenamiento son depósito cerrados y de gran volumen que funcionan de reserva cuando no hay flujo de agua en el sistema, en ocasiones cumplen una función extra la cual es aumentar la carga en el sistema elevando los tanques del nivel suelo (CONAGUA, 2016).

#### **4.11.4. Bombas**

Este componente transforma la energía mecánica que proviene de un motor eléctrico o de combustión para aspirar agua con el fin de elevar la carga y poder conducir el líquido sobre impedimentos del relieve, pueden estar ubicadas en la captación, pero de igual forma pueden

estar en el trayecto de la red hidráulica para aumentar la presión y poder cumplir con las necesidades del proyecto (CONAGUA, 2016).

#### **4.11.5. Piezas especiales**

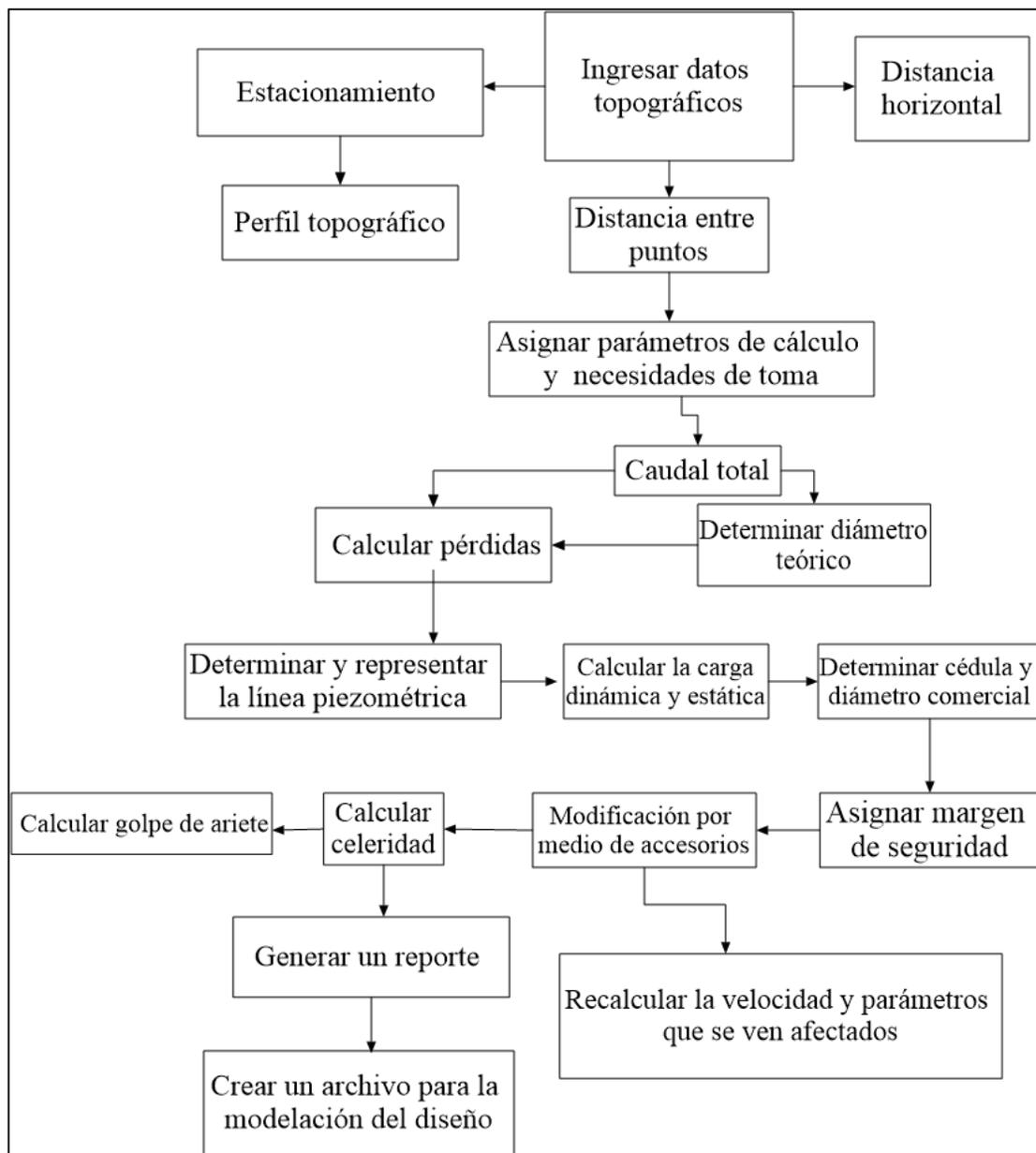
El amoldamiento a las irregularidades del terreno como curvas o codos, ramificaciones, intersecciones o cualquier variación en el sistema que no es posible con la tubería, es necesario el uso de pieza especiales. Al igual que las tuberías estas piezas tienen un espesor y diámetro el cual debe estar acorde a las especificaciones dadas por el fabricante (Trapote, 2014).

#### **4.12 Epanet**

Epanet es un software gratuito utilizado en computadoras donde se puede simular en periodos prolongados una red hidráulica incluyendo todos los parámetros que afectan a esta. Epanet es una herramienta muy útil ya que se puede estimar condiciones hidráulicas en todos los puntos del trayecto, además de crear varios escenarios a través de los accesorios que regulan el sistema. Este simulador cumple la función de corroborar el diseño hidráulico desarrollado por la persona a cargo, además de permitir las modificaciones tanto por un tema de funcionamiento o también económico e interpretar que pasa con estas variaciones (Gamboa & Rico, 2020).

## **5 METODOLOGÍA**

El desarrollo de la aplicación se rige con el diagrama visto en la Figura 8, donde se mantiene la secuencia necesaria para determinar los valores de los parámetros, con el fin de crear un diseño hidráulico a presión, como también la agregación de nuevas variables que facilite el uso y genere resultados tomándose en cuenta.



**Figura 8.** Diagrama para el desarrollo de la aplicación.

## 5.1 Datos iniciales

Al realizar el levantamiento topográfico es necesario que los datos estén en una hoja de cálculo con la terminación *xlsx*, además en las primeras cuatro columnas estén en el siguiente orden descripción de punto, longitud, latitud y elevación respectivamente en unidades métricas, la cantidad de filas no interfiere en el funcionamiento. El usuario no puede modificar los valores que estén en estas columnas. Antes de cargar la información existe un formulario donde el usuario debe seleccionar o asignar valores para realizar los cálculos necesarios.

Para la corroboración y comparativa de la aplicación se utiliza un tramo de un proyecto realizado en Ojo de Agua de Puntarenas por el departamento de SENARA ubicado en Esparza, este tramo es escogido conveniente debido a que entre un punto y otro existe muchas variaciones topográficas como se muestra en el Anexo 4.

## 5.2 Longitud entre puntos

Para determinar la longitud entre puntos se utiliza la ecuación 1, el primer valor de la columna es 0, este valor se genera automáticamente al cargar el archivo topográfico y no es modificable.

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (1)$$

Donde:

$x_2$  = latitud del punto anterior (m)

$x_1$  = latitud del punto actual (m)

$y_2$  = longitud del punto anterior (m)

$y_1$  = Longitud del punto actual (m)

$z_2$  = Elevación del punto anterior (m)

$z_1$  = elevación del punto actual (m)

## 5.3 Estacionamiento

La distancia acumulada se determina con la ecuación 2, lo cual es la distancia del punto actual más la longitud entre puntos anteriores, este valor se genera automáticamente al cargar el archivo topográfico y no es modificable.

$$\sum_1^n l + l_a \quad (2)$$

Donde:

n= cantidad de filas

l= longitud de punto actual (m)

l<sub>a</sub>= longitud del punto anterior (m)

#### 5.4 Distancia horizontal

El valor de la primera columna es 0 y las distancias horizontales posteriores se determina con la ecuación 3, este valor se genera automáticamente al cargar el archivo topográfico y no es modificable.

$$D = \sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2} + D_A \quad (3)$$

Donde:

x<sub>2</sub>= latitud del punto anterior (m)

x<sub>1</sub>= latitud del punto actual (m)

y<sub>2</sub>= longitud del punto anterior (m)

y<sub>1</sub>= Longitud del punto actual (m)

D<sub>A</sub>= Distancia horizontal anterior (m)

#### 5.5 Perfil topográfico

La representación gráfica del perfil topográfico se obtiene utilizando los valores de la columna de estacionamiento como el eje de las abscisas y los valores de la columna de elevación como eje de las ordenadas

## 5.6 Asignación de caudal y carga para las tomas

Para los puntos donde exista una toma se permite al usuario ingresar los requerimientos de caudal y carga en la columna respectiva. Con la finalidad de agilizar el ingreso de datos se tiene un buscador de puntos de interés para casos de proyectos con gran cantidad de tomas, estos valores pueden ser enteros y decimales. Cuando se realice el cálculo, el programa de forma automática corrobora si la carga estática es correcta.

## 5.7 Caudal total del sistema

Este rubro contempla la cantidad de caudal necesario para cumplir las necesidades de las tomas, se obtiene con la ecuación 4, el resultado de esta ecuación se refleja en el primer valor de la columna, se permitirá al usuario modificar siempre que el caudal total sea mayor al requerido, de ser así el usuario puede variar con números enteros o decimales. La secuencia de como disminuye la cantidad de caudal se define con la ecuación 5.

$$\sum_{1}^{n} C_n (4)$$

Donde:

n= ultimo valor de la columna caudal necesario.

C<sub>n</sub>= caudal necesario de los puntos previstos.

$$\sum_{1}^{n} (C_t - C_n) (5)$$

Donde:

n= ultimo valor de la columna caudal total.

C<sub>n</sub>= caudal necesario de los puntos previstos.

C<sub>t</sub>= Caudal total

## 5.8 Determinar el diámetro teórico

Se crea un módulo que permite al usuario indicar el valor máximo de velocidad que se puede presentar en el sistema, al seleccionar la velocidad y con el caudal total para cada punto se determina el diámetro con la ecuación 6. Este valor obtenido es teórico y mínimo para no superar la velocidad máxima deseada, posteriormente funciona para la selección de diámetro comercial con la cédula correcta.

$$D = \sqrt{\frac{C_t * 4}{\pi * v}} \quad (6)$$

Donde:

$C_t$ = Caudal total

$v$ = velocidad seleccionada (m/s)

$D$ = diámetro (m)

## 5.9 Pérdidas generadas

Se le permite al usuario seleccionar la ecuación de pérdidas en el formulario inicial, no puede seleccionar ambas o ningún en módulo creado.

### 5.9.1. Hazen Williams

El usuario puede seleccionar el material a utilizar e ingresar el valor del coeficiente de rugosidad, el valor de las pérdidas de carga se obtiene con la ecuación 7, estos valores de la columna no se pueden modificar.

$$hf = 10.672 * \frac{L}{D^{4.871}} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} \quad (7)$$

Donde:

$H_f$ = pérdidas (m)

$L$ =Longitud de tuberías en (m)

$D$ = diámetro en (m)

$Q$ = caudal en (m<sup>3</sup>/s)

$C$ = coeficiente de rugosidad (tabla 1)

### 5.9.2. Darcy Weisbach

Si el usuario selecciona esta ecuación debe seleccionar el material e ingresar su respectivo coeficiente, las pérdidas se obtienen con la ecuación 8, estos valores de la columna no se pueden modificar.

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (8)$$

Donde:

hf= pérdidas (m)

F= factor de fricción (tabla 2)

L= longitud de tubería (m)

D= diámetro (m)

V= velocidad (m/s)

g= 9.81m/s<sup>2</sup>

### 5.10 Calcular y representar la línea piezométrica

El primer valor de la columna se representa en la ecuación 9, para este cálculo el usuario tiene la posibilidad de suministrar una carga inicial, posteriormente se determina con la ecuación 10 los diferentes valores. La representación gráfica de esta línea se realiza con los valores de la columna de estacionamiento en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas con los valores de la columna de línea piezométrica.

$$LPI = Z + C \quad (9)$$

Donde:

LPI= Nivel piezométrico inicial (m)

Z= elevación del primer punto (m)

C= carga inicial suministrada (m)

$$LP = NP - hf \quad (10)$$

Donde:

LP= Nivel piezométrico (m)

NP= Nivel piezométrico anterior (m)

hf= pérdidas (m)

### 5.11 Carga dinámica y estática

La carga dinámica se obtiene con la ecuación 11, en el caso de la carga estática se obtiene con la ecuación 12, ambas columnas no son modificables por el usuario.

$$CD = LP - Z \quad (11)$$

Donde:

CD= carga dinámica (m)

LP= Nivel piezométrico (m)

Z= elevación del punto (m)

$$C_{est} = LPI - Z \quad (12)$$

Donde:

C<sub>est</sub> = carga estática (m)

LPI= Nivel piezométrico inicial (m)

Z= elevación del punto (m)

### 5.12 Seleccionar cédula y diámetro comercial

La aplicación determina la cédula de la tubería, con base a la carga estática de cada punto y el margen de seguridad, el usuario puede modificar este último rubro a partir de un módulo creado, posterior a esto se selecciona el diámetro comercial resguardando que no se supere la velocidad máxima ingresada por el usuario. Al variar el diámetro el sistema recalcula de forma automática los parámetros del sistema, incluyendo la velocidad del líquido con la ecuación 13, para el cálculo del nuevo diámetro se contempla el área efectiva de la tubería.

$$v = \frac{C_t * 4}{\pi * D^2} \quad (13)$$

Donde:

V= velocidad del fluido (m/s)

C<sub>t</sub>= Caudal total (m<sup>3</sup>/s)

D= diámetro (m)

### 5.13 Margen de seguridad

El porcentaje que existe de margen de seguridad con respecto a la carga soportada por la tubería y la carga que se está dando en el sistema está dado por la ecuación 14, esta columna no es modificable.

$$C_{est(final)} = C_{est} + (C_{est} * \frac{\%}{100}) \quad (14)$$

Donde:

C<sub>est(final)</sub> = carga final para la elección de la tubería (m)

C<sub>est</sub> = carga estática (m)

% = porcentaje de seguridad que el usuario desea.

### 5.14 Modificaciones con accesorios

Para la red hidráulica los accesorios que modifican la presión de forma activa son las bombas, tanque quiebra gradiente y válvulas reguladoras de presión, estos dos últimos funcionan como reductores. Para todos los casos se utiliza la analogía del primer punto inicial de la línea piezométrica, pero en este caso se añade o se resta al nivel piezométrico.

### 5.15 Celeridad

En el formulario inicial mediante el módulo creado el usuario tiene la posibilidad de calcular el golpe de ariete seleccionando el método de cálculo de la celeridad en el sistema.

#### 5.15.1. Método completo

Al utilizar este método la celeridad se estima con la ecuación 15, en el módulo creado le permite al usuario ingresar los valores respectivos para la estimación de la celeridad.

$$c = \frac{\sqrt{\frac{k}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{k * D}{E * e}}} \quad (15)$$

Donde:

C= celeridad (m/s)

k= módulo de elasticidad del fluido (kg/m<sup>2</sup>)

ρ= densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

D= diámetro interno de la tubería (m)

E= módulo de elasticidad del material (kg/m<sup>2</sup>)

e= espesor de la tubería (m)

### 5.15.2. Método simplificado

Si se opta por este método la celeridad se determina con la ecuación 16, los valores de la columna no son modificables.

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \frac{k * D}{e}}} \quad (16)$$

Donde:

C= celeridad (m/s)

D= diámetro interno de la tubería (m)

e= espesor de la tubería (m)

k= coeficiente (adimensional)

## 5.16 Golpe de ariete

El golpe de ariete se determina con la ecuación 17, esta columna no es modificable y los colores de las casillas varían con respecto al rango de presión que se presente.

$$A = \frac{c * V}{g} \quad (17)$$

Donde:

V= velocidad del fluido (m/s)

A= golpe de ariete (m)

c= celeridad (m/s)

g= 9.81 m/s<sup>2</sup>

### **5.17 Presión total del sistema y sobrepresión**

La determinación de la posible totalidad de carga que se presenta en la red hidráulica se determina con la ecuación 18, la sobrepresión es determinada con la ecuación 19, para los casos de existir sobrepresión las casillas toman el color rojo, todos los valores de estas columnas no son modificables.

$$PT = C_{est} + A \quad (18)$$

Donde:

PT= Presión total (m)

C<sub>est</sub> = carga estática (m)

A= golpe de ariete (m)

$$S = PT - PNT \quad (19)$$

Donde:

S= Sobrepresión

PT= Presión total (m)

PNT= presión nominal de la tubería (m)

### **5.18 Reporte y presupuesto**

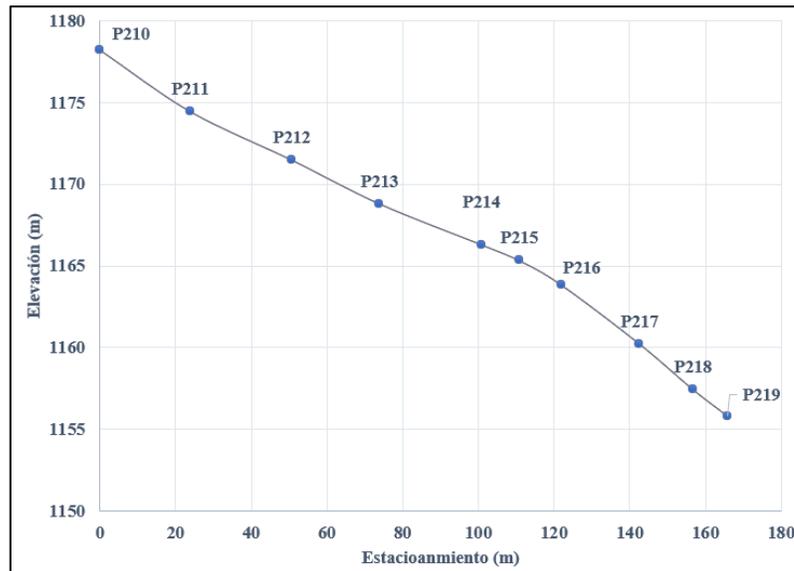
El usuario puede generar un reporte mediante el módulo creado en el cual visualice la cantidad de tubos necesarios según las especificaciones, con base a la cantidad de tubos y las características se genera un posible costo de los materiales base para el desarrollo del proyecto, también se puede generar un costo total contemplando un descuento.

### 5.19 Modelación en Epanet

El diseño hidráulico puede ser exportado con todas las características topográficas hacia Epanet por medio de una función de la aplicación que genera un documento interpretable, esto con el objetivo de modelar el diseño y corroborar el funcionamiento.

### 5.20 Estudio de caso

Los resultados finales se expondrán en un estudio de caso comparativo con el antiguo sistema empleado por SENARA, con la aplicación desarrollada en el trabajo, esto consiste en un trayecto del proyecto de Ojo de Agua de Puntarenas que se visualiza en la Figura 9 donde se contempla para el punto P219 una necesidad hídrica de  $0.0232\text{m}^3/\text{s}$ .



**Figura 9.** Perfil topográfico del trayecto Ojo de Agua Puntarenas.

## **6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 6.1 Agregar datos topográficos a la aplicación

Los datos topográficos se cargan mediante el botón “nuevo”, posterior a esto es necesario agregar diferentes datos iniciales para la generación del diseño de la red hidráulica, con el botón Cargar puntos XYZ emerge una ventana donde se selecciona un archivo xlsx.

## 6.2 Longitud entre puntos, estacionamiento y distancia horizontal.

Los datos se generan de forma automática en la obtención de la longitud, el estacionamiento y la distancia horizontal, debido a que depende meramente de las condiciones topográficas, los valores dados por la aplicación se representan en la Cuadro 4, al comparar la información con el Cuadro 5 que son los valores generados por SENARA, se puede corroborar que en el caso del primer punto la longitud con respecto al punto anterior es 0 m debido a que no se contempla puntos previos, la distancia horizontal y estacionamiento en este caso es diferente ya que no existe puntos anteriores que se acumulen.

**Cuadro 4.** *Cálculo de longitud entre puntos, estacionamiento y distancia horizontal.*

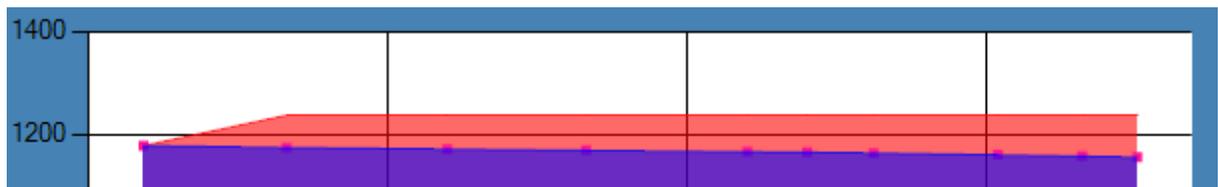
Punto	Longitud (m)	Estacionamiento (m)	Distancia horizontal (m)
P210	0	0	0
P211	23,9	23,9	23,5978
P212	26,8	50,7	50,2339
P213	23,2	73,9	73,327
P214	26,9	100,8	100,1576
P215	10	110,8	110,0616
P216	11,1	121,9	121,0378
P217	20,7	142,6	141,386
P218	14,1	156,7	155,2266
P219	9,2	165,9	164,2911

**Cuadro 5.** Longitud, estacionamiento y distancia horizontal del trayecto del proyecto.

<i>Punto</i>	<i>L</i>	<i>Est</i>	<i>Distancia</i>
P210	22,6	4430,9	4365,6
P211	23,9	4454,8	4389,2
P212	26,8	4481,6	4415,9
P213	23,2	4504,8	4439,0
P214	26,9	4531,7	4465,8
P215	10,0	4541,7	4475,7
P216	11,1	4552,8	4486,7
P217	20,7	4573,4	4507,0
P218	14,1	4587,6	4520,9
P219	9,2	4596,8	4529,9

### 6.3 Perfil topográfico

La generación del perfil topográfico se hace a través del botón perfil, el cual genera una gráfica de la elevación versus estacionamiento como se observa en la figura 10 representado con el color morado, se observa los 10 puntos tomados en cuenta.



**Figura 10.** Perfil topográfico.

### 6.4 Caudal total del sistema

El caudal total del sistema se determina de forma automática al ingresar todos los puntos que tengan una necesidad hídrica, para la validación con el proyecto de Ojo de Agua se asigna un caudal de  $0.0232 \text{ m}^3/\text{s}$  para el último punto y como se demuestra con la Cuadro 6 la aplicación diseña el tránsito del caudal por todos los puntos, mismo caso para el sistema actual como se

denota en el Cuadro 7, por lo que se corrobora el correcto funcionamiento de acuerdo con las disposiciones de SENARA.

**Cuadro 6.** *Caudal total del sistema.*

Punto	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
P210	0,0232
P211	0,0232
P212	0,0232
P213	0,0232
P214	0,0232
P215	0,0232
P216	0,0232
P217	0,0232
P218	0,0232
P219	0,0232

**Cuadro 7.** *Caudal de la sección del proyecto Ojo de Agua.*

<i>Punto</i>	<i>Caudal (l/s)</i>
P210	23,19
P211	23,19
P212	23,19
P213	23,19
P214	23,19
P215	23,19
P216	23,19
P217	23,19
P218	23,19
P219	23,19

## 6.5 Pérdidas generadas

### 6.5.1. Hazen Williams

Con la selección de este método en la aplicación se aprecian las pérdidas generadas, esto se evidencia en el Cuadro 8, se puede comprobar su similitud con las pérdidas calculas en el sistema actual que se observan en el Cuadro 9. Las pérdidas para el primer punto es 0 m, debido a que no se tiene una longitud para determinarse, la variación de decimales se da por la conversión de unidades que realiza el sistema empleado por SENARA.

**Cuadro 8.** *Pérdidas generadas por método Hazen Williams.*

Punto	Pérdidas (m)
P210	0
P211	0,0472
P212	0,0565
P213	0,0489
P214	0,0567
P215	0,0211
P216	0,0234
P217	0,0437
P218	0,0323
P219	0,0211

**Cuadro 9.** Pérdidas por método de Hazen Williams en sistema actual.

<i>Punto</i>	<i>H</i>
P210	0,0442
P211	0,0489
P212	0,0549
P213	0,0476
P214	0,0552
P215	0,0204
P216	0,0227
P217	0,0423
P218	0,0289
P219	0,0208

## 6.6 Línea piezométrica y representación gráfica

Al calcular los valores de la línea piezométrica mostrados con el Cuadro 10, se muestran semejantes a los cálculos obtenidos por el sistema actual representados en el cuadro 11. La representación gráfica de esta línea se genera en conjunto con el perfil del terreno como se muestra en la figura 11 donde se grafica el valor de la línea piezométrica versus el estacionamiento de color naranja.

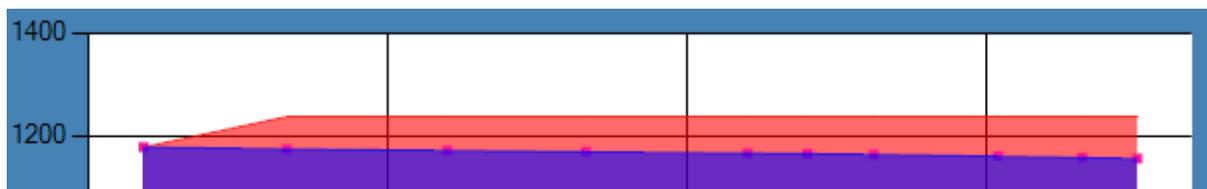
Para el cálculo de la aplicación se contempla la carga acumulada anterior de 59.5m, esta carga se agrega al valor inicial del nivel piezométrico, esto con el fin de que las condiciones hidráulicas sean iguales. Las diferencias entre los decimales se deben a las variaciones que existen en el cálculo de las pérdidas, el cual es un factor directo que afecta la línea piezométrica.

**Cuadro 10.** Línea piezométrica.

Punto	Nivel piezométrico (m)
P210	1237,713
P211	1237,7099
P212	1237,7065
P213	1237,7035
P214	1237,7
P215	1237,6987
P216	1237,6973
P217	1237,6946
P218	1237,6926
P219	1237,6895

**Cuadro 11.** Línea piezométrica en el sistema actual.

<i>Punto</i>	<i>NP</i>
P210	1237,7
P211	1237,7
P212	1237,6
P213	1237,6
P214	1237,5
P215	1237,5
P216	1237,5
P217	1237,4
P218	1237,4
P219	1237,4



**Figura 11.** Representación de la línea piezométrica.

## 6.7 Carga dinámica y estática

Las cargas se calculan de forma automática y están influenciadas por el valor inicial en el nivel piezométrico, en el Cuadro 12 se detalla los valores de ambas cargas generadas por la aplicación y se pueden corroborar con el Cuadro 13 del sistema actual, donde se denota una gran similitud en los valores.

**Cuadro 12.** Cálculo de carga dinámica y estática por medio de la aplicación.

Punto	Carga dinámica (m)	Carga estática (m)
P210	59,5	59,5
P211	63,2679	63,271
P212	66,2255	66,232
P213	68,9005	68,91
P214	71,392	71,405
P215	72,3597	72,374
P216	73,8433	73,859
P217	77,4486	77,467
P218	80,2226	80,243
P219	81,8545	81,878

**Cuadro 13.** *Cálculo de carga dinámica y estática con el sistema actual.*

<i>Punto</i>	<i>CD</i>	<i>Cest</i>
P210	59,5	59,5
P211	63,2	63,2
P212	66,1	66,1
P213	68,8	68,8
P214	71,2	71,2
P215	72,2	72,2
P216	73,6	73,6
P217	77,2	77,2
P218	79,9	79,9
P219	81,5	81,5

## **6.8 Selección de tuberías**

### **6.8.1. Cédula y margen de seguridad**

La selección de la cédula depende de los valores que se encuentren en la columna de carga estática, la selección se realiza con el anexo 1 el cual son las tuberías comercializadas por la empresa Durman en Costa Rica, las características físicas y costos se ingresan a la base de datos como se muestra en la Figura 12, la aplicación permite ingresar un margen de seguridad para la elección de la cédula y depende de la presión máxima que soporte cada cédula.

baseDatos

Darcy Weisbach Hazen Williams Cédula

🔍

	Código	Diámetro	Cédula	PSI	MCA	Diámetro interno	Espesor	Precio cementad.	Precio empaque
▶	Ced11	12	sdr 13.5	315	221,76	18,2	3,1	7246,69	0
	Ced12	12	sch 40	600	422,4	15,8	5,5	12009,64	0
	Ced13	12	sch 80	850	598,4	13,8	7,5	12762,22	0
	Ced14	18	sdr 17	250	176	23,5	3,2	11262,71	0
	Ced15	18	sch 40	480	337,92	20,9	5,8	20721,94	0
	Ced16	18	sch 80	690	485,76	18,9	7,8	21620	0
	Ced17	25	sdr 17	250	176	29,5	3,9	20162,59	0
	Ced18	25	sdr 26	160	112,64	30,4	3	10357,58	0
	Ced19	25	sch 40	450	316,8	26,6	6,8	30411,69	0

Diámetro  M.C.A  Precio cementada    
 Cédula  Diámetro Interno    
 PSI  Espesor  Precio con empaque

**Figura 12.** Diferentes tuberías contenidas en la base de datos.

En la Cuadro 14 muestra la elección que hace la aplicación de forma automática al ingresar los parámetros anteriores, en este caso se contempla un margen de seguridad de un 10% debido a que es el utilizado por el departamento de SENARA, como se puede ver en el Cuadro 15, la selección de cédula es el mismo excepto por el punto 211 y 218, esto debido a que inicialmente el sistema actual emplea varias conversiones de unidades lo que provoca una ligera alteración en el resultado final de carga estática, esto genera que la aplicación elija una cédula que soporte una mayor presión.

**Cuadro 14.** Selección de cédula de la tubería por medio de la aplicación.

Punto	Cédula
P210	sdr 41
P211	sdr 41
P212	sdr 32.5
P213	sdr 32.5
P214	sdr 32.5
P215	sdr 32.5
P216	sdr 32.5
P217	sdr 32.5
P218	sdr 26
P219	sdr 26

**Cuadro 15.** Selección de cédula con el sistema actual.

<b><i>Punto</i></b>	<b><i>Ced</i></b>
P210	41
P211	32.5
P212	32.5
P213	32.5
P214	32.5
P215	32.5
P216	32.5
P217	32.5
P218	32.5
P219	26

### 6.8.2. Diámetro comercial

Al realizar la elección del diámetro teórico mediante la aplicación se establece una correcta elección del diámetro comercial, se realiza con base a que este valor no puede ser inferior al calculado anteriormente, con el fin que no sea superada la velocidad, la aplicación utiliza el diámetro interior de la tubería. En el Cuadro 16 se muestra los diferentes diámetros interiores de las tuberías seleccionadas por la aplicación, como se puede comprobar con el Cuadro 17.

**Cuadro 16.** Selección de diámetro de la tubería por medio de la aplicación.

Punto	Diámetro (m)
P210	0,2084
P211	0,2084
P212	0,2056
P213	0,2056
P214	0,2056
P215	0,2056
P216	0,2056
P217	0,2056
P218	0,2022
P219	0,2022

**Cuadro 17.** Selección de diámetro con el sistema actual.

<b><i>Punto</i></b>	<b><i>D (mm)</i></b>
P210	208
P211	206
P212	206
P213	206
P214	206
P215	206
P216	206
P217	206
P218	206
P219	202

### **6.9 Recalculo con valores de tubería comerciales**

Al darse la variación de diámetro, es necesario el recalculo de los datos, como se muestra en el Cuadro 18 los valores generados por la aplicación de las velocidades que se presentan entre puntos, presentan diferencias con el sistema actual utilizado por SENARA, visualizado en el Cuadro 19, esto debido las variaciones anteriormente comentadas.

**Cuadro 18.** *Cálculo de la velocidad por medio de la aplicación.*

Punto	Velocidad (m/s)
P210	0,6801
P211	0,6801
P212	0,6988
P213	0,6988
P214	0,6988
P215	0,6988
P216	0,6988
P217	0,6988
P218	0,7225
P219	0,7225

**Cuadro 19.** *Cálculo de la velocidad por medio del sistema actual.*

<i>Punto</i>	<i>V</i>
P210	0,7
P211	0,7
P212	0,7
P213	0,7
P214	0,7
P215	0,7
P216	0,7
P217	0,7
P218	0,7
P219	0,7

Además, al variar el diámetro es necesario calcular nuevamente las pérdidas, nivel piezométrico, carga dinámica y carga estática, este recalcu se genera de forma automática.

### 6.10 Modificación y asignación de los accesorios

La aplicación permite agregar una serie de accesorios, el caso del tanque quiebra gradiente, válvula reguladora de presión y bombas, son los únicos accesorios que modifican el cálculo hidráulico del diseño. En el Cuadro 20 se denota el efecto que tiene una válvula reguladora con relación de 1 a 3 aguas abajo. En el sistema actual la modificación se debe realizar de forma manual y solo permite agregar una breve descripción de lo que se desea incluir en ese punto, esta facilidad no lo tiene el sistema de SENARA.

**Cuadro 20.** *Modificación hidráulica con válvula reguladora.*

Punto	Carga dinámica (m)	Carga estática (m)	Cédula	Accesorios
P210	59,5	59,5	sdr 41	
P211	21,03	21,03	sdr 41	Reguladora
P212	23,9345	23,991	sdr 41	
P213	26,5636	26,669	sdr 41	
P214	29,0019	29,164	sdr 41	
P215	29,9498	30,133	sdr 41	
P216	31,4114	31,618	sdr 41	
P217	34,9757	35,226	sdr 41	
P218	37,7194	38,002	sdr 41	
P219	39,3333	39,637	sdr 41	

### 6.11 Golpe de ariete

Al determinar el golpe de ariete mediante el método simplificado de la celeridad, se muestran los datos en el Cuadro 21, los valores de este apartado toman relevancia para la elección definitiva de la cédula de la tubería para la prevención de daños. El sistema actual de SENARA no contempla este fenómeno, como protección se tiene un 10% de margen de seguridad.

**Cuadro 21.** *Cálculo del golpe de ariete en los diferentes puntos.*

Punto	Celeridad (m/s)	GolpeAriete (m)
P210	374,8666	25,9885
P211	374,8666	25,9885
P212	419,8899	29,9102
P213	419,8899	29,9102
P214	419,8899	29,9102
P215	419,8899	29,9102
P216	419,8899	29,9102
P217	419,8899	29,9102
P218	468,2138	34,4836
P219	468,2138	34,4836

## 6.12 Presión total y sobrepresión

Al determinar la posible carga extra en la tubería mediante la aplicación se determina la carga total en el sistema, contemplando las condiciones topográficas y la carga que genera el golpe de ariete, en el Cuadro 22 se muestra los valores de la presión total para el método simplificado, actualmente el sistema de SENARA no genera un módulo de cálculo donde se aprecie la carga total que podría sufrir la tubería.

**Cuadro 22.** *Estimación de presión total.*

Punto	Presión total (m)
P210	25,9885
P211	29,7595
P212	36,6422
P213	39,3202
P214	41,8152
P215	42,7842
P216	44,2692
P217	47,8772
P218	55,2266
P219	56,8616

### 6.13 Reporte de tuberías y presupuesto

Al ejecutar la función de reporte se genera de forma automática un archivo PDF. En la Figura 13 muestra el reporte generado para el tramo seleccionado, esto facilita la interpretación de los datos.

<b>Reporte de materiales y costos del proyecto</b>	
•	23,9m, diámetro comercial 8", 5 tubos, precio unitario @312.922,99, costo total @1564614,95
•	118,7m, diámetro comercial 8", 21 tubos, precio unitario @452.369,51, costo total @9.499.759,71
•	23,3m, diámetro comercial 8", 4 tubos, precio unitario @516.858,61, costo total @2.067.434,44
•	Costo total @13.131809,1

**Figura 13.** Reporte de tuberías del tramo del proyecto.

## **6.14 Modelación**

La aplicación tiene la función de exportar el diseño hidráulico contemplando todas las características topográficas hacia la aplicación Epanet para su respectiva modelación, esto por medio de un archivo compatible con esta.

## **6.15 Ventajas de la aplicación sobre el sistema actual**

### **6.15.1. Bloqueo de celdas**

La aplicación solo permite ingresar datos en casillas que son necesarias para el cálculo de todos los parámetros y con esto obtener el diseño hidráulico, con el fin de prevenir la modificación accidental de los datos topográficos o cálculos realizados. El sistema actual se emplea en una hoja de cálculo donde es posible modificar cualquier valor lo que puede generar errores en la selección de las tuberías y accesorios.

### **6.15.2. Caudal total, Asignación de caudal y carga para las tomas**

En el caso de existir un proyecto con varios puntos de captación es obligatorio agregar las necesidades hídricas y de carga para cada toma, en el sistema actual empleado por SENARA estas necesidades se deben asignar de forma manual, la aplicación al tener un filtro de búsqueda por puntos acelera el proceso de asignación reduciendo el tiempo de generación del diseño hidráulico, además, en el caso de existir la necesidad de transportar agua extra a la requerida por las tomas, se tiene la posibilidad de agregar este caudal en la primer casilla de la columna de caudal total, el cual se suma de forma automática con el ya contemplado y de esta forma generar un diseño con base a estos parámetros.

### **6.15.3. Calcular las pérdidas con Darcy Weisbach**

La aplicación permite generar diseños hidráulicos contemplando como método de cálculo de pérdidas la ecuación de Hazen Williams, así como también con la ecuación de Darcy

Weisbach, dando más posibilidades de generar resultados y poder trabajar con algunos fluidos diferentes al agua, el sistema actual estrictamente genera diseños tomando en cuenta la ecuación de Hazen Williams.

#### **6.15.4. Base de datos**

La aplicación posibilita el almacenamiento de datos dentro de ella misma sin la necesidad de instalar una aplicación de terceros, esto permite guardar información de nuevas tuberías o modificar de acuerdo con las especificaciones del mercado, la hoja de cálculo que se utiliza actualmente tiene de manera fija las tuberías establecidas, no es posible modificar de una forma simple, caso similar con los precios de estas.

#### **6.15.5. Selección de tuberías y diámetro utilizado**

Para la selección de tuberías la aplicación contempla la presión que existe en el trayecto y el diámetro, esto último con el fin de que la velocidad no sea superior a la establecida, para el primer aspecto existe un margen de seguridad donde se agrega un porcentaje que se adapte a las necesidades, pero contemplado de igual forma el diámetro mínimo. El sistema actual considera un margen de seguridad fijo no es cambiante, sumado a esto el cálculo de parámetros se realiza con el diámetro nominal y no con el interno.

#### **6.15.6. Accesorios**

En el sistema actual la función de agregar accesorios no existe como tal, es necesario realizar las variaciones que provocan aguas abajo de forma manual, la aplicación ejecuta este método de una forma simple y ágil, sin la necesidad de realizar cálculos que pueden incurrir en el error.

### 6.15.7. Golpe de ariete

Actualmente este fenómeno no es calculado por el sistema actual y dado a esto se establece el margen de seguridad de un 10% para evitar fallos en el sistema, la aplicación permite prever la presión que podría generar el fenómeno por dos métodos de cálculo de la celeridad, esto posibilita realizar una mejor selección de la cédula de la tubería manipulando este rubro a través del margen de seguridad.

## 6.16 Manual de usuario

Para el uso de la aplicación CADIMO es necesario el sistema operativo Windows 10, no es necesario una instalación de la aplicación o de una base de datos, solo correr el ejecutable. El levantamiento topográfico es necesario que se encuentre con la terminación .xlsx, además que en las primeras 4 columnas tenga el orden y las palabras como se muestra en la Figura 14.

<i>Punto</i>	<i>Lat</i>	<i>Long</i>	<i>Elev.</i>
--------------	------------	-------------	--------------

**Figura 14.** Orden necesario del levantamiento topográfico.

### 6.16.1. Menú principal

En esta ventana como se muestra en la Figura 15 se tiene la opción de “Nuevo” la cual permite realizar un diseño hidráulico con los parámetros que el usuario crea pertinentes. La opción “base de datos” abre una nueva ventana de la base datos donde está contenida información de los métodos de cálculos de pérdidas y características físicas de las tuberías, así como su precio.



**Figura 15.** *Menú principal.*

### **6.16.2. Base de datos**

Las primeras dos pestañas permiten almacenar información correspondiente a los métodos de cálculo de pérdidas de carga como se muestra en la Figura 16, permitiendo agregar, eliminar y guardar con las opciones respectivas, es necesario que el usuario ingrese los datos correctos para cada método. La última pestaña llamada “cédula” permite ingresar las características de las tuberías como se muestra en la Figura 17, de igual forma es posible modificar, eliminar y guardar nuevos datos con las opciones correspondientes, además con el icono de lupa es posible buscar un material para el caso de los métodos y tubería para el caso de cédula, este icono también tiene la función de mostrar todos los datos almacenados en cada pestaña.

baseDatos

Darcy Weisbach Hazen Williams Cédula

🔍

	Código	Material	c
▶	DW20	pvc	0,0015
	DW21	fundicion	0,6
	DW22	acero comercial	0,09
	DW23	cobre	0,0015
	DW24	hierro forjado	0,09
	DW25	hierro galvanizado	0,24

Material  C

Nuevo Eliminar Guardar

**Figura 16.** Ingreso de información en la base de datos para los métodos de cálculo de pérdidas.

baseDatos

Darcy Weisbach Hazen Williams Cédula

🔍

	Código	Diámetro	Cédula	PSI	MCA	Diametro interno	Espesor	Precio cementada:	Precio empaque
▶	Ced11	12	sdr 13.5	315	221,76	18,2	3,1	7246,69	0
	Ced12	12	sch 40	600	422,4	15,8	5,5	12009,64	0
	Ced13	12	sch 80	850	598,4	13,8	7,5	12762,22	0
	Ced14	18	sdr 17	250	176	23,5	3,2	11262,71	0
	Ced15	18	sch 40	480	337,92	20,9	5,8	20721,94	0
	Ced16	18	sch 80	690	485,76	18,9	7,8	21620	0
	Ced17	25	sdr 17	250	176	29,5	3,9	20162,59	0
	Ced18	25	sdr 26	160	112,64	30,4	3	10357,58	0
	Ced19	25	sch 40	450	316,8	26,6	6,8	30411,69	0

Diametro  M.C.A

Cédula  Diametro Interno

PSI  Espesor

Precio cementada  Precio con empaque

Nuevo Eliminar Guardar

**Figura 17.** Ingreso de información en la base de datos sobre las tuberías comerciales.

### **6.16.3. Parámetros para el diseño hidráulico**

En la Figura 18 se muestra una serie de opciones, en la primera de ellas con el nombre de “Fórmula” permite seleccionar la ecuación de pérdidas de carga, ya sea Hazen Williams o Darcy Weisbach, luego el usuario debe seleccionar el material a utilizar y de forma automática la aplicación sugiere un coeficiente de pérdidas, pero es un valor modificable. Posteriormente el usuario debe ingresar la velocidad máxima con la que el fluido va a transitar por las tuberías para el primer calculo total teórico esto en las unidades correspondientes.

El usuario tiene la posibilidad de calcular el golpe de ariete, si así se desea debe marcar una ecuación para el cálculo de la celeridad, en caso de marcar la figura izquierda se realizará por el método completo o ecuación de Joukowski donde es necesario ingresar la densidad del fluido como también el módulo de elasticidad de la tubería y el fluido. Si el usuario selecciona la figura derecha por método simplificado o por la ecuación de Allievi, basta con ingresar el coeficiente representativo de elasticidad del material conductor. Posterior a este proceso al ejecutar el botón “cargar puntos XYZ” se despliega una nueva ventana de búsqueda para seleccionar el archivo del levantamiento topográfico, al seleccionarlo automáticamente se despliega la ventana de diseño hidráulico.

Ingreso de datos

Formula

Material

Coeficiente de pérdidas

Velocidad máxima (m/s)

Calcular golpe de ariete Si  No

Ecuación de celeridad

$$c = \frac{\sqrt{\frac{k}{p}}}{\sqrt{1 + \frac{k \cdot D}{E \cdot e}}}$$

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + \frac{\hat{a} \cdot D}{e}}}$$

Densidad del liquido (kg/m3)

Cargar puntos XYZ

**Figura 18.** *Parámetros para el diseño hidráulico.*

#### 6.16.4. Caudal necesario, carga de toma y caudal total

Para el caso de caudal necesario y carga de toma se puede ingresar el caudal y carga para una toma respectivamente, el caudal total se asigna de forma automática debido a la suma de todos los caudales de toma, pero es posible agregar un caudal extra en la primera casilla de caudal total como se muestra en el Cuadro 23, este se suma de forma automática a la cantidad estimada anteriormente

**Cuadro 23.** *Asignar un caudal extra al sistema.*

Caudal necesario (m <sup>3</sup> /s)	Carga de toma (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
		0.1
		0,026
		0,026
		0,026
		0,026
		0,026
		0,026
		0,026
		0,026
0,026	20	0,026

### 6.16.5. Carga inicial

Al ejecutar el botón “determinar tuberías” se despliega los valores de pérdidas calculadas según la ecuación seleccionada y también los valores del nivel piezométrico, en la primera casilla es posible agregar la carga inicial que el usuario considere o que el sistema necesite para su funcionamiento como se visualiza en el Cuadro 24.

**Cuadro 24.** *Asignar carga inicial.*

Nivel piezométrico (m)	Carga dinámica (m)	Carga estática (m)
1.5	0	0
1174,2886	-0,1534	3,771
1169,888	-1,593	6,732
1166,0785	-2,7245	9,41
1161,6615	-4,6465	11,905
1160,0195	-5,3195	12,874
1158,1969	-5,6571	14,359
1154,7979	-5,4481	17,967
1152,4827	-4,9873	20,743
1150,972	-4,863	22,378

### 6.16.6. Margen de seguridad

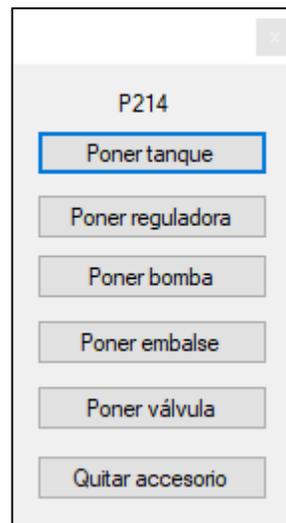
El usuario puede agregar un margen de seguridad como se ve en la Figura 19, este valor se agrega en porcentaje, con esta función el usuario puede cambiar la cédula a utilizar para efectos posteriores al determinar el golpe de ariete que se puede presentar.

A rectangular form with a light gray background. On the left side, the text "Margen de seguridad" is displayed in a blue font. To the right of this text is an empty rectangular input field.

**Figura 19.** *Asignar margen de seguridad.*

### 6.16.7. Manipulación del diseño con accesorios

El sistema puede sufrir cambios hidráulicos con los tres primeros accesorios que se observan en la Figura 20, para estos accesorios es necesario ingresar la información respectiva a través de la ventana que emerge al seleccionarlo, para los siguientes accesorios son meramente de descripción, pero todos cumplen un papel importante para la exportación hacia Epanet, la ventana emergente marca el punto que el usuario está interactuando.

A vertical menu window with a light gray background. At the top, the text "P214" is centered. Below it are seven buttons stacked vertically. The first button, "Poner tanque", is highlighted with a blue border. The other buttons are "Poner reguladora", "Poner bomba", "Poner embalse", "Poner válvula", and "Quitar accesorio".

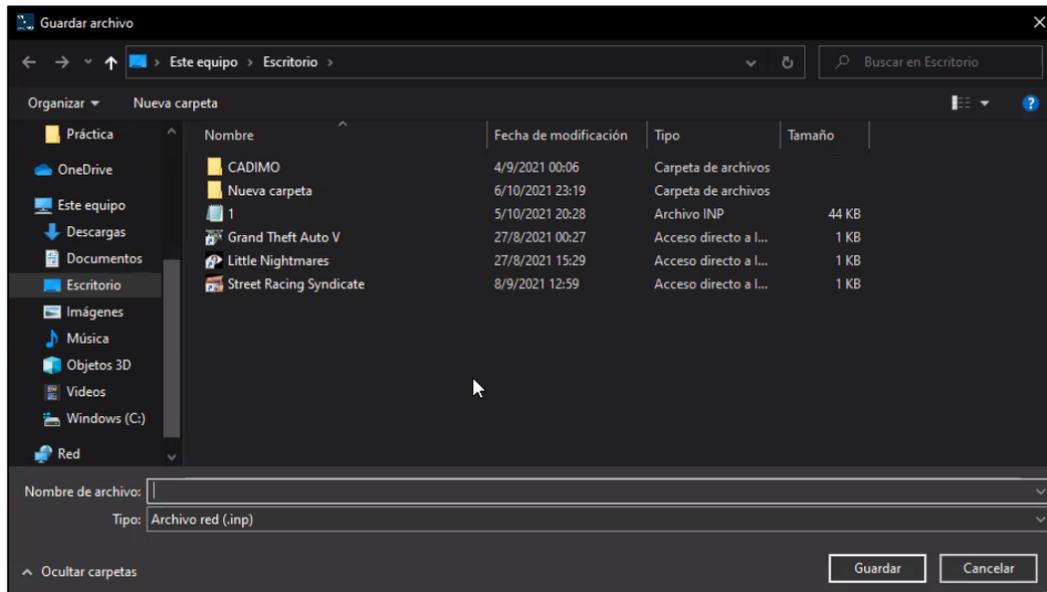
**Figura 20.** *Asignar accesorios al sistema.*

### 6.16.8. Exportar a Epanet

El usuario tiene la posibilidad de exportar el diseño hidráulico creado en la aplicación por medio de la ejecución del botón exportar mostrado en la Figura 21, la aplicación crea un archivo con terminación `inp` el cual guarda los datos topográficos y características de la tubería que son interpretables para Epanet, al ejecutar este botón se despliega una ventana de búsqueda para seleccionar el lugar de almacenamiento y el nombre del archivo como se muestra en la Figura 22. Cuando se genera el archivo se ejecuta en Epanet por medio de la función de importar de esta aplicación de modelación, es necesario que el usuario verifique la ecuación de cálculo de pérdidas de Epanet y las unidades de caudal para el correcto funcionamiento



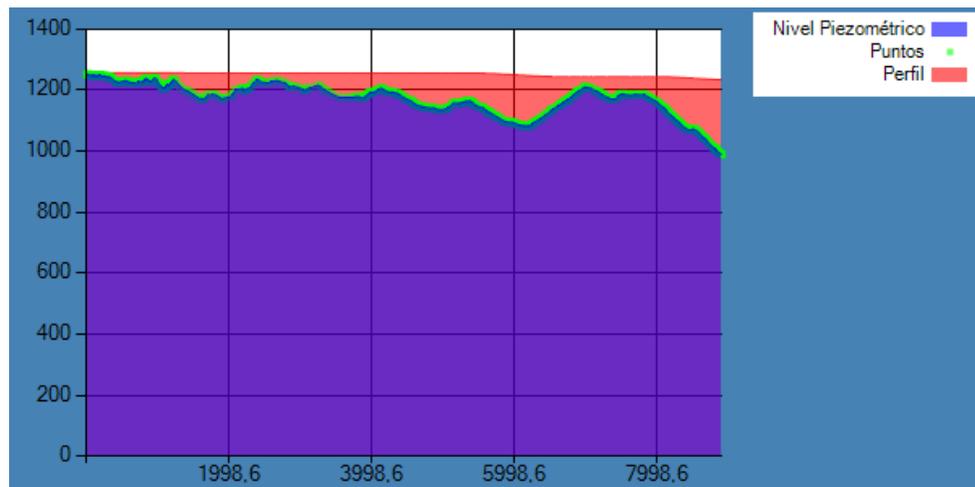
Figura 21. Botón de exportar.



**Figura 22.** *Ventana de búsqueda.*

### 6.16.9. Perfil topográfico

Por medio de la función perfil el usuario puede generar una representación gráfica tanto del perfil del terreno como también de la línea piezométrica, como se aprecia en la Figura 23, esto con la finalidad de facilitar la interpretación de los valores generados por la aplicación.



**Figura 23.** *Perfil generado por medio de la aplicación.*

### 6.16.10. Reporte de materiales y costos

Al ejecutar la función reporte, el usuario puede exportar la información por medio de un documento PDF, el cual contiene la longitud que abarca la tubería, diámetro comercial, cédula, cantidad de tubos y costos, un ejemplo de reporte generado a través del diseño hidráulico se observa en la Figura 24.

Reporte de materiales y costos del proyecto

142,6 m, diámetro comercial: 200 mm, sdr 26, 25 tubos, precio unitario: ¢516,85861, costo total: ¢12921,46525.

23,3 m, diámetro comercial: 200 mm, sdr 17, 5 tubos, precio unitario: ¢759,5182, costo total: ¢3797,591.

Costo total: ¢16719,05625

**Figura 24.** *Reporte generado a través de la aplicación.*

## **7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **7.1 Conclusiones**

- Se crearon módulos que entreguen información topográfica al usuario, así como la lista de materiales, la interpretación espacial, el costo y un archivo para la modelación en Epanet por medio de las funciones respectivas de la aplicación, tal como se muestra en los resultados de reporte, Cuadro 4, en el apartado de modelación, evidenciando un mejoramiento del sistema actual.
- Se estableció un módulo mediante la aplicación para calcular el golpe de ariete, con el fin de orientar al usuario en la selección de la cédula y esto sea representado en la lista de materiales, esto se evidencia en el Cuadro 21, lo cual se muestra como un agregado de suma importancia, ya que el sistema actual no lo calcula.
- Se diseñó un manual con la finalidad de que el usuario interprete las funciones de manera adecuada de la aplicación a trabajar, esto se encuentra en el apartado 6.16, así se garantiza el funcionamiento óptimo de la aplicación.

## **7.2 Recomendaciones**

- Implementar como mejora de la aplicación en la búsqueda de acelerar y facilitar el proceso de creación de un diseño hidráulico, agregar accesorios de control a través del perfil topográfico.
- Desarrollar un método de ingreso de las necesidades de las tomas donde se interprete cierta numeración que es ingresada por el topógrafo en la descripción del punto, para que la aplicación de forma automática rellene los valores respectivos de necesidades con el objetivo de acelerar el proceso en proyecto donde existan muchos puntos de captación.

- Con la finalidad de desarrollar una apariencia más agradable para diferentes usuarios, es útil la creación de comandos donde este pueda elegir los colores y el aspecto final.
- Crear un archivo de exportación del diseño hidráulico interpretable para la aplicación de modelación de WaterCAD, con el fin de tener otra posibilidad de corroborar para el usuario.

## **8 Bibliografía**

- Alegret, E., & Martínez, Y. (2019). *Coeficiente de Hazen-Williams en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa*. Habana: Universidad Tecnológica de la Habana .
- Arnalich, S. (2021). *Epanet y Cooperación, Introducción al cálculo de redes de agua por ordenador* . Santiago : Uman.
- Blanca, V., Langa, J., & Tormo, M. (2014). *Mantenimiento de redes de distribución de agua y saneamiento* . Madrid: Ediciones Paraninfo.
- CONAGUA. (9 de agosto de 2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y sanamiento*. Obtenido de Comisión Nacional del Agua, Secretaría de medio ambiente y recursos naturales del gobierno de México.: [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/CONAGUA%20s.f.a.%20Disen%C3%B1o%20de%20redes%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20agua%20potable.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%20s.f.a.%20Disen%C3%B1o%20de%20redes%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20agua%20potable.pdf)
- Corcho, F., & Duque, J. (2005). *Acueductos teoría y diseño* . Medellín: Editorial Universidad de Medellín .
- Corral, I. (2009). *Topografía de obras*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Durman. (2021). *Catálogo de productos, lista predial junio 2021*. Alajuela: Durman by aliaxis.
- Escobar, A. (12 de enero de 2009). *Criterios modernos de localización de válvulas en redes de distribución de agua potable*. Obtenido de Repositorio Universidad de los Andes, Bogota, Colombia: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/23961/u346151.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Franquet, J. (2019). *Dimensionamiento y distribución de las conducciones hidráulicas*. Cervantes: Gráfica Dertosense.
- Gamboa, J., & Rico, J. (15 de Mayo de 2020). *Elaboración del modelo hidráulico para la red de distribución de agua potable de Funza Cundinamarca utilizando el software Epanet* . Obtenido de Repositorio de Universidad Católica de Colombia , faculta de ingeniería civil, Bogotá: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24798/1/DOCUMENTO%20TESIS%20G%26R.pdf>

- Jiménez, J. (10 de agosto de 2013). *Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario*. Obtenido de Universidad Veracruzana, Facultad de ingeniería civil : <https://www.uv.mx/ingenieriacivil/files/2013/09/Manual-de-Diseno-para-Proyectos-de-Hidraulica.pdf>
- Luszczewski, A. (2012). *Redes industriales de tubería. Bombas para agua, ventiaidores y compresores*. Barcelona: Reverté ediciones S.A.
- Méndez, M. (2007). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua* . Caracas: Publicaciones Universidad Católica Andrés Bello .
- Nieto, J. (2010). *Instalaciones de fontanería teoría y orientaciones prácticas*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Nieto, J. (2015). *Manipulación y ensamblaje de tuberías*. Madrid: Ediciones Paraninfo.
- Putier, S. (2015). *VB.NET y Visual Studio 2015, los fundamentos de lenguaje* . Barcelona: Ediciones ENI.
- Ribot, J., & Nacenta, J. (2017). *Guía practica de dimensionado de tuberías agua, gas, calefacción y energía solar* . Barcelona: Ediciones Experiencia S.L.
- Sánchez, L., Latorre, J., & Díaz, J. (2011). *Aplicaciones de la tecnología de filtración en multiples etapas con sistemas de riego*. Cali: Editorial Universidad del Valle .
- Sánchez, R., Castañón, G., & Gil, M. (2017). *Proyecto de instalación de redes de abastecimiento y distribución de agua y saneamiento*. Madrid: Ediciones Nobel S.A.
- SCIJ. (30 de AGOSTO de 2017). *Sistema Costarricense de información Jurídica* . Obtenido de ACUERDO N°5497: [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&param2=1&nValor1=1&nValor2=85031&nValor3=109878&strTipM=TC&IResultado=2&nValor4=1&strSelect=sel](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&param2=1&nValor1=1&nValor2=85031&nValor3=109878&strTipM=TC&IResultado=2&nValor4=1&strSelect=sel)
- SENARA. (18 de julio de 1983). *SENARA*. Obtenido de Funciones de la institución : [http://www.senara.or.cr/acerca\\_del\\_senara/quienes\\_somos.aspx](http://www.senara.or.cr/acerca_del_senara/quienes_somos.aspx)
- Solís, D. (14 de Mayo de 2021). simplificación en el proceso de desarrollo de un diseño hidráulico. (I. Quirós, Entrevistador)
- Tandazo, R. (07 de noviembre de 2012). *Importar datos de una red de excel a epanet [archivo de video]*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=Q1Bdx5n5LBY>

- Toledo, A. (13 de agosto de 2009). *Estudio y experimento del fenómeno de golpe de ariete, debido a cierre de válvulas, para el laboratorio de hidráulica*. Obtenido de Biblioteca de Univeridad de San Carlos de Guatemala: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_3018\\_C.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3018_C.pdf)
- Trapote, A. (2014). *Infraestructuras hidáulico -Sanitarias II. Sanemaiento y drenaje urbano* . Alicante: Editorial Universidad de Alicante.
- UPV. (19 de octubre de 2017). *Cómo convertir una red de tubería en autocad a una red en epanet [archivo de video]* . Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=wQuu1OX-bOM>

## **9 ANEXOS**

**Anexo 1. Especificaciones de las tuberías comercializadas en Costa Rica.**

		<b>Presión</b>				
<b>Diámetro comercial</b>		Cédula	PSI	m.c.a	Diámetro interno (mm)	Espesor (mm)
<b>12mm</b>	1/2"	SDR 13,5	315	221,76	18,2	3,1
		SCH 40	600	422,4	15,8	5,5
		SCH 80	850	598,4	13,8	7,5
<b>18 mm</b>	3/4"	SDR 17	250	176	23,5	3,2
		SCH 40	480	337,92	20,9	5,8
		SCH 80	690	485,76	18,9	7,8
<b>25mm</b>	1"	SDR17	250	176	29,5	3,9
		SDR26	160	112,64	30,4	3
		SCH 40	450	316,8	26,6	6,8
		SCH 80	630	443,52	24,3	9,1
<b>31mm</b>	1 1/4"	SDR17	250	176	37,2	5
		SDR26	160	112,64	38,9	3,3
		SDR32,5	125	88	39,1	3,1
		SDR41	100	70,4	39,8	2,4
		SCH 40	370	260,48	35	7,2
		SCH 80	520	366,08	32,5	9,7
<b>38mm</b>	1 1/2"	SDR17	250	176	42,6	5,7
		SDR26	160	112,64	44,6	3,7
		SDR32,5	125	88	45,3	3
		SDR41	100	70,4	45,9	2,4
		SCH 40	330	232,32	40,9	7,4
		SCH 80	470	330,88	38,1	10,2
<b>50mm</b>	2"	SDR17	250	176	53,2	7,1
		SDR26	160	112,64	55,4	4,9
		SDR32,5	125	88	56,6	3,7
		SDR41	100	70,4	57,4	2,9
		SCH 40	280	197,12	52,5	7,8
		SCH 80	400	281,6	49,2	11,1

<b>Presión</b>						
<b>Diámetro comercial</b>	Cédula	PSI	m.c.a	Diámetro interno (mm)	Espesor (mm)	
<b>62mm</b>	2 1/2"	SDR17	250	176	64,4	8,6
		SDR26	160	112,64	67,4	5,6
		SDR32,5	125	88	68,5	4,5
		SDR41	100	70,4	69,5	3,5
		SCH 40	300	211,2	62,7	10,3
		SCH 80	420	295,68	59	14
<b>75mm</b>	3"	SDR17	250	176	78,4	10,5
		SDR26	160	112,64	82	6,9
		SDR32,5	125	88	83,4	5,5
		SDR41	100	70,4	84,6	4,3
		SCH 40	260	183,04	77,9	11
		SCH 80	370	260,48	73,7	15,2
<b>100mm</b>	4"	SDR17	250	176	100,8	13,5
		SDR26	160	112,64	105,5	8,8
		SDR32,5	125	88	107,3	7
		SDR41	100	70,4	108,7	5,6
		SCH 40	220	154,88	102,3	12
		SCH 80	320	225,28	97,2	17,1
<b>150mm</b>	6"	SDR17	250	176	148,5	19,8
		SDR26	160	112,64	155,3	13
		SDR32,5	125	88	157,9	10,4
		SDR41	100	70,4	160,1	8,2
		SCH 40	180	126,72	154,1	14,2
		SCH 80	280	197,12	146,4	21,9
<b>200mm</b>	8"	SDR17	250	176	193,3	25,8
		SDR26	160	112,64	202,2	16,9
		SDR32,5	125	88	205,6	13,5
		SDR41	100	70,4	208,4	10,7
		SCH 80	250	176	193,7	25,4

<b>Presión</b>						
<b>Diámetro comercial</b>	Cédula	PSI	m.c.a	Diámetro interno (mm)	Espesor (mm)	
<b>250mm</b>	10"	SDR17	250	176	240,9	32,2
		SDR26	160	112,64	252,1	21
		SDR32,5	125	88	256,2	16,9
		SDR41	100	70,4	259,8	13,2
		SCH 80	230	161,92	243	30,1
<b>300mm</b>	12"	SDR17	250	176	285,8	38
		SDR26	160	112,64	299	24,8
		SDR32,5	125	88	303,9	19,9
		SDR41	100	70,4	308,1	15,7
		SCH 80	230	161,92	288,9	34,9
<b>375mm</b>	15"	SDR26	160	112,64	358,7	29,9
		SDR32,5	125	88	364,7	23,9
		SDR41	100	70,4	369,7	18,9
<b>450mm</b>	18"	SDR26	160	112,64	422	35,2
		SDR32,5	125	88	429,1	28,1
		SDR41	100	70,4	434,9	22,3

*Fuente:* (Durman, 2021)

**Anexo 2. Costos de las tuberías comercializadas en Costa Rica.**

Lista de precios (¢)				Lista de precios (¢)						
Diámetro comercial	Cédula	Tubería cementada	Tubería con empaque	Diámetro comercial	Cédula	Tubería cementada	Tubería con empaque			
<b>12mm</b>	<b>1/2"</b>	SDR 13,5	7246,69	<b>100mm</b>	<b>4"</b>	SDR17	202264,35			
		SCH 40	12009,64			SDR26	136594,4	146130,47		
		SCH 80	12762,22			SDR32,5	112333,3	130498,05		
<b>18 mm</b>	<b>3/4"</b>	SDR 17	11262,71			SDR41	85542,13	103698,97		
		SCH 40	20721,94			SCH 40	-	-		
		SCH 80	21620,29			SCH 80	176,781	-		
<b>25mm</b>	<b>1"</b>	SDR17	20162,59			<b>150mm</b>	<b>6"</b>	SDR17	449436,03	467427,89
		SDR26	10357,58					SDR26	302758,64	318283,71
		SCH 40	30411,69					SDR32,5	265173,71	283340,72
		SCH 80	32955,32	SDR41	220244,91			238406,27		
<b>31mm</b>	<b>1 1/4"</b>	SDR17	31505,53	SCH 40	-			-		
		SDR26	19797,6	SCH 80	415156,35			-		
		SDR32,5	18457,42	SDR17	759518,2			827623,3		
		SDR41	16543,2	SDR26	516858,61			547799,14		
		SCH 40	-	SDR32,5	452369,51	470537,65				
		SCH 80	35538,5	SDR41	312922,99	400030,17				

Lista de precios (€)				Lista de precios (€)					
Diámetro comercial	Cédula	Tubería cementada	Tubería con empaque	Diámetro comercial	Cédula	Tubería cementada	Tubería con empaque		
38mm	1 1/2"	SDR17	41478,91	-	250mm	10"	SCH 80	-	
		SDR26	26890,61	-			SDR17	1559116,4	1349635,8
		SDR32,5	22954,82	-			SDR26	1006115,8	919791,75
		SDR41	18529,74	-			SDR32,5	780727,17	741622,39
		SCH 40	-	-			SDR41	660646,59	651707,16
		SCH 80	43012,32	-			SCH 80	-	-
50mm	2"	SDR17	63289,04	65379,54	300mm	12"	SDR17	2109751,8	2000961,1
		SDR26	43484,66	44372,84			SDR26	1416448,2	1332249,7
		SDR32,5	34898,92	-			SDR32,5	1174050,8	1011284,5
		SDR41	26329	-			SDR41	844347,3	831507,11
		SCH 40	-	-			SCH 80	-	-
		SCH 80	56746,34	-			SDR26	-	2057646,4
62mm	2 1/2"	SDR17	98151,8	-	375mm	15"	SDR32,5	-	-
		SDR26	63700,36	-			SDR41	-	-
		SDR32,5	52089,61	-			SDR26	-	-
		SDR41	50726,83	-	450mm	18"	SDR32,5	-	-
		SCH 40	-	-			SDR41	-	-
		SCH 80	111382,97	-					

<b>Lista de precios (€)</b>				
<b>Diámetro comercial</b>	<b>Cédula</b>	<b>Tubería cementada</b>	<b>Tubería con empaque</b>	
<b>75mm</b>	<b>3"</b>	<b>SDR17</b>	<b>124003,94</b>	<b>131617,88</b>
		SDR26	82097,89	87098,14
		SDR32,5	68327,71	85278,84
		SDR41	56049,13	74211,62
		SCH 40	-	-
		SCH 80	119722,37	-

*Fuente:* (Durman, 2021)



Válvula reguladora de aire



Válvula reguladora de presión



Válvula Sostenedora de presión

**Anexo 3. Diferentes válvulas utilizadas por SENARA.**

Fuente: Escobar (2009).

**Anexo 4.** *Levantamiento topográfico de una sección del proyecto Ojo de Agua.*

<b><i>Punto</i></b>	<b><i>Long</i></b>	<b><i>Lat</i></b>	<b><i>Elev.</i></b>
P210	423993,654	1131479,36	1178,213
P211	424015	1131469,3	1174,442
P212	424036,407	1131453,45	1171,481
P213	424052,336	1131436,73	1168,803
P214	424067,977	1131414,93	1166,308
P215	424068,257	1131405,03	1165,339
P216	424063,139	1131395,32	1163,854
P217	424046,505	1131383,6	1160,246
P218	424034,307	1131377,06	1157,47
P219	424025,356	1131375,63	1155,835