



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS COMPARATIVO, EN LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE
HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH PARA DISEÑOS DE
ACUEDUCTOS RURALES EN GUATEMALA**

Ricardo Rodolfo Guzmán Ajcibinac

Asesorado por el Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga

Guatemala, junio de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO, EN LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE
HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH PARA DISEÑOS DE
ACUEDUCTOS RURALES EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RICARDO RODOLFO GUZMÁN AJCIBINAC

ASESORADO POR EL ING. DENNIS SALVADOR ARGUETA MAYORGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JUNIO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Polanco Aguilar
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Ernesto Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. Milton José de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

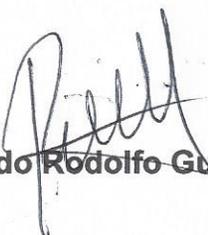
DECANO	Ing. Pedro Antonio Polanco Aguilar
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS COMPARATIVO, EN LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH PARA DISEÑOS DE ACUEDUCTOS RURALES EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 6 de marzo de 2018.


Ricardo Rodolfo Guzmán Ajcibinac

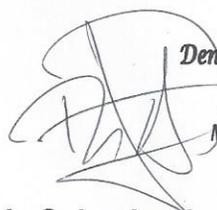
Guatemala 26 de abril de 2019

Ingeniero
Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Sandoval:

Por medio de la presente me permito informar que, en mi calidad de asesor nombrado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, he procedido a la revisión final del trabajo de graduación titulado **ANÁLISIS COMPARATIVO, EN LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH PARA DISEÑOS DE ACUEDUCTOS RURALES EN GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante universitario Ricardo Rodolfo Guzmán Ajcibinac, Carné No. 2014-03550, determinando que el mismo cumple con los requisitos establecidos, por lo que de la manera más atenta solicito se autorice continuar con los trámites pertinentes para la aprobación final.

Atentamente,


Dennis Salvador Argueta Mayorga

INGENIERO CIVIL
MAESTRO EN INGENIERIA VIAL
MAESTRO EN INGENIERIA SANITARIA
COLEGIADO 8297

MSc. Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga
Asesor
No. de Colegiado: 8297



Guatemala, 15 de Mayo de 2019

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Director Escuela de Ingeniería Civil

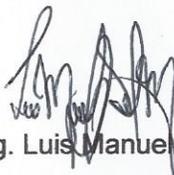
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado **“ANÁLISIS COMPARATIVO, EN LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH PARA DISEÑOS DE ACUAEDUCTOS RURALES EN GUATEMALA”**, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Ricardo Rodolfo Guzmán Ajcibinac, quien contó con la asesoría del ingeniero Dennis Salvador Argueta Mayorga.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el tramite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Dr C. Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Jefe del Departamento de Hidráulica





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Dennis Salvador Argueta Mayorga y del Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Ricardo Adolfo Guzmán Ajcibinac ANÁLISIS COMPARATIVO, EN LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH PARA DISEÑOS DE ACUEDUCTOS RURALES EN GUATEMALA da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, junio 2019

/mmm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala

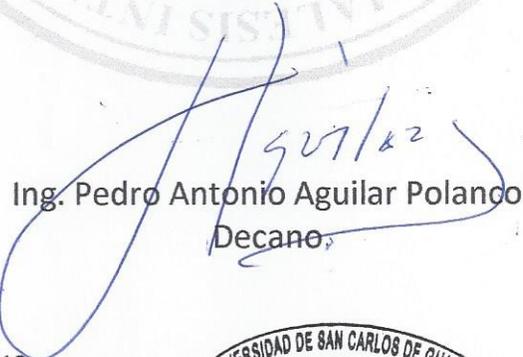


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 282.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS COMPARATIVO, EN LA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE HAZEN-WILLIAMS Y DARCY-WEISBACH PARA DISEÑOS DE ACUEDUCTOS RURALES EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Ricardo Rodolfo Guzmán Ajcibinac**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, junio de 2019



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi guía, mi amigo, mi todo.

Mis padres

Fredy Guzmán y Lidia Ajcibinac, que siempre me apoyaron en todo momento.

Mi asesor

Ingeniero Dennis Argueta, por haberme instruido en el desarrollo del trabajo de graduación.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por haberme puesto en este camino.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la <i>alma mater</i> que ha provisto de vastos conocimientos en tópicos ingenieriles y ayudado a cumplir uno más de mis sueños.
Facultad de Ingeniería	Por darme enseñanza y permitirme ser un profesional.
Mis amigos de la Facultad	Edwards Arana, Tony Baca, Vivian Reynoso, Jaime Rojas, Fernando Manzo, Oscar García, Kati de Paz, Alejandra Franco, Nestor Ampérez y Hugo Salguero.
Mi asesor	Ingeniero Dennis Argueta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.1. Flujo y tipos de flujo.....	1
1.1.1. Flujo uniforme en tuberías	3
1.1.2. Experimento de Reynolds.....	6
1.1.3. Número de Reynolds	9
1.2. Ecuación de Darcy-Weisbach.....	14
1.3. Ecuación de Hazen-Williams	19
2. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE ACUEDUCTOS O SISTEMAS DE ABASTECIMIENTOS DE AGUA POTABLE.....	21
2.1. Levantamiento topográfico	21
2.1.1. Planimetría.....	21
2.1.2. Altimetría.....	21
2.2. Período de diseño	22
2.3. Estimación de población futura.....	22
2.3.1. Método geométrico	24
2.4. Consumo de agua	24
2.5. Factores de consumo	25

2.5.1.	Factor día máximo.....	26
2.5.2.	Factor hora máximo	27
2.6.	Caudales de diseño.....	29
2.6.1.	Dotaciones	29
2.6.2.	Caudal medio diario	29
2.6.3.	Caudal máximo diario.....	30
2.6.4.	Caudal máximo horario	30
2.7.	Presiones máximas y mínimas.....	31
2.8.	Tipos y clases de tuberías.....	31
3.	PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN, LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN Y REDES DE DISTRIBUCIÓN	33
3.1.	Líneas de conducción	33
3.1.1.	Tipos de líneas de conducción	34
3.2.	Líneas por gravedad (de conducción y de distribución)	36
3.2.1.	Cálculo del diámetro en una tubería.....	40
3.3.	Redes de distribución.....	41
3.3.1.	Requerimientos	42
3.3.2.	Información requerida para el diseño de una red	44
3.3.2.1.	Información acerca del servicio actual de agua potable	44
3.3.2.2.	Información requerida para el proyecto.....	45
3.3.2.3.	Información adicional	45
3.3.3.	Tipos de redes de distribución.....	46
3.3.3.1.	Tipos de redes adoptables	46

4.	MARCO PRÁCTICO	49
4.1.	Caso número 1	50
4.2.	Caso número 2	63
4.3.	Caso número 3	71
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	87
5.1.	Variaciones en los valores de diseño	87
5.2.	Propuestas de diseño	94
5.2.1.	Factor de seguridad en la altura disponible	97
	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES	101
	BIBLIOGRAFÍA	103
	APÉNDICE	105

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Volumen de control para flujo en una tubería.....	3
2.	Esquema del aparato utilizado por O. Reynolds para establecer el régimen del flujo en tuberías	6
3.	Resultados del primer experimento de Reynolds	7
4.	Flujo turbulento en tuberías.....	8
5.	Flujos similares alrededor de esferas de diferentes tamaños	9
6.	Triángulos de fuerzas para los puntos homólogos 2 y 2' de los flujos alrededor de las esferas similares	10
7.	Gráfica del desvío del caudal promedio diario	26
8.	Gráfica del desvío del caudal promedio horario	28
9.	Conducción por gravedad	37
10.	Gráfica para determinar longitudes y diámetros en líneas por conducción por gravedad.....	39
11.	Partes que comprende una red de distribución.....	42
12.	Extracto de la línea piezométrica del caso 1	88
13.	Variaciones porcentuales (diferencia de presiones dinámicas calculadas con Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para varias temperaturas).....	90
14.	Errores típicos del análisis estadístico de las variaciones porcentuales en la aplicación de las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para varias temperaturas	92
15.	Perfil y las líneas piezométricas del caso 2.....	93
16.	Isoterma de temperatura máxima absoluta anual	95

17.	Isoterma de temperatura máxima absoluta anual	96
18.	Perfil de propuesta de diseño	98

TABLAS

I.	Propiedades del agua	14
II.	Rugosidad absoluta (Ks) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías.....	18
III.	Coeficientes Hazen-Williams, C_h	20
IV.	Especificaciones para tubería ASTM D-2241 (PVC).....	49
V.	Especificaciones para tubería de hierro galvanizado.....	50
VI.	Datos del caso 1	56
VII.	Pérdidas del caso 1	58
VIII.	Piezométrica del caso 1	60
IX.	Dinámicas y estática del caso 1.....	62
X.	Datos del caso 2	68
XI.	Pérdidas del caso 2	69
XII.	Piezométricas del caso 2	70
XIII.	Dinámicas y estática del caso 2.....	71
XIV.	Datos del caso 3	76
XV.	Pérdidas del caso 3	79
XVI.	Piezométricas del caso 3	81
XVII.	Dinámicas y estática del caso 3.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área
C_h	Coeficiente de Hazen-Williams
cm	Centímetro
d	Diámetro
Din	Dinámica
Ec	Ecuación
Est	Estación
Estat	Estática
f	Factor de fricción de Darcy
fdm	Factor día máximo
fhm	Factor hora máximo
g	Gravedad
Hf	Energía por unidad de peso pérdida por fricción
Hp	Factor de fricción de Darcy
Ks	Rugosidad absoluta
log	Logaritmo base 10
m	Metro
mm	Milímetro
Pi	Población inicial
Pf	Población futura
Piez	Piezométrica
PVC	Policloruro de vinilo
P.O.	Punto observado

Q	Caudal
Q_{md}	Caudal medio diario
Q_{max.diario}	Caudal máximo diario
Q_{max.horario}	Caudal máximo horario
R	Tasa de crecimiento
R_h	Radio hidráulico
Re	Número de Reynolds
S_f	Pendiente de fricción
T	Temperatura
v	Velocidad
W	Peso del fluido en el volumen de control
°C	Grados Celsius
ρ	Densidad
γ	Peso específico
ν	Viscosidad cinemática
η	Viscosidad dinámica
“	Pulgadas

GLOSARIO

Aceleración	Incremento de la velocidad en la unidad de tiempo.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
Altimetría	Parte de la topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos para determinar y representar la altura respecto a un nivel de referencia.
Caudal	Cantidad de agua por unidad de tiempo.
Densidad	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia, o entre la masa de una sustancia y la masa de un volumen igual de otra sustancia tomada como patrón.
Dotación	Asignación de personal y medios necesarios para el funcionamiento de un lugar o servicio.
Ecuación	Igualdad entre dos expresiones que contiene una o más variables.
Experimento	Prueba que consiste en provocar un fenómeno en unas condiciones determinadas con el fin de analizar

sus efectos o de verificar una hipótesis o un principio científico.

Factor Elemento, circunstancia, influencia, que contribuye a producir un resultado.

Fluido Nombres propios en otros idiomas no requieren cursiva. Sustancia material cuyas partículas.

Flujo Movimiento de un fluido.

Fricción Rozamiento entre dos cuerpos en contacto, presentando oposición al desplazamiento.

Gravedad Fuerza de atracción que la tierra u otro cuerpo celeste ejerce sobre los cuerpos que están cerca o sobre él.

Hidráulica Parte de la mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los fluidos.

INFOM Instituto de Fomento Municipal.

Iteración Repetición, reiteración.

Isoterma Línea que en los mapas meteorológicos une los puntos de lugares de la superficie terrestre que tienen la misma temperatura en la unidad de tiempo considerada.

Longitud	Dimensión de una línea o de un cuerpo considerando su extensión en línea recta.
Pendiente	Inclinación de un cuerpo con respecto a una línea de referencia, usualmente se mide en grados.
Presión	Magnitud física que mide la fuerza de un fluido aplicada a una superficie.
Piezométrica	Relaciona la energía de un fluido incompresible con la altura de una columna estática equivalente de ese fluido.
Viscosidad	Propiedad de los fluidos que se gradúa por la velocidad de salida de aquellos a través de tubos capilares.

RESUMEN

El presente trabajo se fundamenta en el análisis comparativo de la aplicación de las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para tres diseños específicos de acueductos rurales en Guatemala. Primero, se abordan de forma general los conceptos generales y las definiciones esenciales de los componentes que intervienen en el proceso de diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable, con énfasis en los tipos de flujo, la determinación de las pérdidas de carga o energía, la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach.

Luego, se indican los parámetros de diseño de acueductos que contemplan: levantamiento topográfico, periodo de diseño, estimación de población futura, factores de consumo, caudales de diseño, presiones máximas, presiones mínimas y finalmente los tipos y clases de tubería que se utilizan en Guatemala.

En el tercer capítulo se describe el procedimiento para diseñar líneas de conducción y distribución, que se sustenta en la determinación del diámetro de tubería a utilizar, dependiendo del tipo de tubería que se desea colocar, así como en función del caudal y las longitudes de diseño.

En los capítulos cuatro y cinco se presenta el marco práctico (resultados) y el análisis de resultados, respectivamente. Se realiza un análisis de la variación porcentual de las diferencias aritméticas de los valores obtenidos con la ecuación de Hazen-Williams y con la ecuación de Darcy-Weisbach,

determinándose que para temperaturas menores a 10 °C y mayores a 20 °C hay variaciones de hasta más del 40 %.

OBJETIVOS

General

Realizar un análisis comparativo en la aplicación de las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para diseños específicos de acueductos rurales en Guatemala.

Específicos

1. Analizar los criterios de diseño para abastecimiento de agua potable utilizados actualmente en Guatemala
2. Explicar Hazen-Williams y Darcy-Weisbach, detallando las regulaciones en la aplicación de las mismas.
3. Realizar 3 casos de estudio para diseñar acueductos rurales, aplicando las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach.
4. Analizar las variaciones en cuanto a diseño, de la aplicabilidad de las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach.
5. Proponer criterios de diseño para optimizar las planificaciones de proyectos nuevos relacionados con sistemas de abastecimiento de agua potable.

INTRODUCCIÓN

El diseño de acueductos o sistemas de abastecimiento de agua potable en Guatemala, históricamente, ha sido un tema de notable importancia para la mejora de la calidad de vida de los habitantes de una región determinada. De acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud La proporción de población con acceso sostenible a una fuente de agua mejorada es de 78,7 %. Esto se traduce en que más de 3 millones de habitantes de Guatemala no cuentan con un servicio sostenible de abastecimiento de agua potable.

Técnicamente, para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable en Guatemala se aplica la ecuación de Hazen-Williams, obteniendo longitudes de diseño para diámetros específicos. La fórmula de Hazen-Williams es una de las más populares para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos. Su uso se limita al flujo de agua en tuberías con diámetros mayores de 2,0 pulgadas y menores de 6 pies (72,0 pulgadas). La velocidad del flujo no debe exceder los 10,0 pies/s (3,05 m/s). Asimismo, está elaborada para agua a 60 °F (15,6 °C). Su empleo con temperaturas mucho más bajas o altas ocasionaría cierto error.

El presente trabajo de graduación ayuda a la conceptualización del procedimiento de cálculo de sistemas de abastecimiento potable, sustentándose en marcos teóricos referenciales previamente definidos; y se busca a la vez analizar la variación entre el empleo de la ecuación de Hazen-Williams y la de Darcy-Weisbach para tres casos de estudio y describir, por consiguiente, las posibles consideraciones a tomar en cuenta para optimizar los diseños.

1. CONCEPTOS GENERALES

Para realizar diseños de sistemas de abastecimiento de agua potable se deben comprender algunos conceptos fundamentales en relación con definiciones y criterios básicos, dentro de los que destaca la consideración de las fuerzas que actúan en la tubería; dado a que un fluido puede estar en equilibrio estático y equilibrio dinámico.

1.1. Flujo y tipos de flujo

Un fluido, desde la perspectiva de su comportamiento mecánico, es una sustancia que no presentaría resistencia a un esfuerzo de naturaleza de corte. Si se presenta, el fluido tiende a deformarse y esta acción continuará, siempre y cuando exista el esfuerzo de corte. En este desarrollo de deformación constante, las diferentes partes del fluido van cambiando de posición relativa permanente, y a su vez presentan un movimiento relativo en relación con un contorno sólido. A esta interacción de movimientos se le conoce como flujo.

En términos sencillos, flujo es el movimiento de un fluido con respecto a un sistema inercial de coordenadas, generalmente ubicado en un contorno sólido. Ejemplos de flujo son el movimiento del agua en el cauce de un río, el movimiento del agua subterránea a través del subsuelo y, por supuesto, el movimiento de fluidos en el interior de tuberías. El flujo en cualquier tipo de ducto, principalmente en tuberías, se puede determinar mediante las siguientes cantidades físicas:

- Desplazamiento de una partícula de fluido

- Velocidad de una partícula de fluido en un punto del campo de flujo
- Aceleración de una partícula de fluido en un punto del campo de flujo

Las anteriores cantidades pueden permanecer constantes o variar con el espacio o con el tiempo. Con respecto al espacio, los flujos se clasifican en uniformes (si las cantidades físicas permanecen constantes en el espacio) y no uniformes. Con respecto al tiempo se clasifican en permanentes o estacionarios (si las cantidades de flujo permanecen constantes en el tiempo) y no permanentes. Estos cuatro tipos de flujos se combinan, así:

- Flujo uniforme permanente. Ninguna de las características del flujo (presión y velocidad) varían en el espacio o el tiempo.
- Flujo uniforme no permanente. Las características no varían con el espacio, pero sí con el tiempo. Es muy difícil encontrar este tipo de flujo en la naturaleza, debido a que los cambios tendrían que ocurrir en forma simultánea a todo lo largo de la tubería (la velocidad de la señal de cambio tendría que ser infinita).
- Flujo variado permanente. Las características del flujo varían con el espacio, pero no con el tiempo. Existen dos subtipos de flujo
 - Gradualmente variado. Los cambios en las características del flujo (presión y velocidad) son graduales a lo largo de la dirección principal de este. Las contracciones y expansiones suaves en tuberías, el flujo a través de tubos Venturi, entre otros, son ejemplos de flujos gradualmente variados.
 - Rápidamente variado. Los cambios en las características del flujo son abruptos a lo largo de la dirección principal de este. Por ejemplo, las contracciones abruptas en tuberías, el flujo a través de válvulas y los rotores de bombas se caracterizan por ser flujos rápidamente variados. Generalmente, este tipo de flujo va acompañado de gran turbulencia.
- Flujo variado no permanente. Las características del flujo varían con el espacio y con el tiempo. Debido a que el flujo uniforme no permanente no existe, este nuevo tipo se conoce con el nombre de flujo no permanente. En el caso de tuberías, el flujo no permanente se denomina golpe de ariete, debido a que usualmente está acompañado por ruidos fuertes, además de cambios bruscos en presión y velocidad, típicos de este tipo de flujo.¹

¹ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 2.

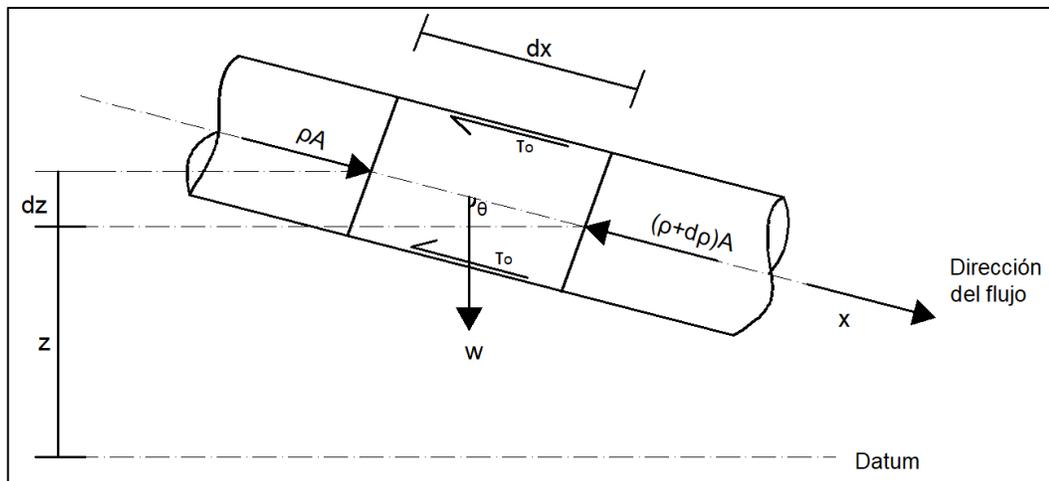
1.1.1. Flujo uniforme en tuberías

En el flujo uniforme, las características del flujo (presión y velocidad en la tubería) permanecen constantes en el espacio y en el tiempo. Por consiguiente, es el tipo de flujo más fácil de analizar y sus ecuaciones se utilizan para el diseño de sistemas de tuberías. Debido a que la velocidad no está cambiando, el fluido no está siendo acelerado. Si no hay aceleración, según la segunda ley de Newton para el movimiento, la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre un volumen de control de fluido debe ser cero. Es decir, existe un equilibrio de fuerzas.

En el caso del flujo en tuberías actúan tres fuerzas: de presión, gravitacionales y de fricción. Las primeras siempre tratan de acelerar el flujo. Las fuerzas gravitacionales (o de peso) tratan de acelerar el flujo si este se mueve desde una cota alta a una cota baja o tratan de frenarlo si el movimiento es en sentido contrario. Las fuerzas de fricción siempre tratan de frenarlo. En el caso del flujo uniforme a través de una tubería con pendiente negativa en el sentido del flujo, existe un equilibrio entre las fuerzas de fricción, por un lado, y las fuerzas gravitacionales y de presión, por el otro.

Dada la importancia de las fuerzas de fricción en el problema del flujo uniforme, el cual es básico para el diseño de sistemas de tuberías. El equilibrio dinámico que alcanza una tubería cuando se encuentra en estado de flujo uniforme se representa en la siguiente figura, en la cual se detallan las fuerzas anteriormente descritas.²

Figura 1. Volumen de control para flujo en una tubería



Fuente: SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 4.

² SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 3.

Si el fluido contenido en el volumen de control mostrado en la figura 1 no se está acelerando, entonces $\sum F_x = 0$. Tomando en consideración esta premisa, se obtiene la siguiente ecuación:

$$pA - (p + dp)A + W \cos \theta - \tau_0 P dx = 0 \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

- A = área mojada (área de la sección transversal interna del tubo)
- P = perímetro mojado (perímetro interno del tubo)
- W = peso del fluido en el volumen de control
- p = presión interna
- τ_0 = esfuerzo cortante en la pared interna de la tubería
- θ = ángulo de inclinación de la tubería

El peso del volumen de control es:

$$W = \rho g A dz \quad [\text{Ec. 2}]$$

Luego:

$$-dpA - \rho g A dz - \tau_0 P dx = 0 \quad [\text{Ec. 3}]$$

De acuerdo con la figura 1:

$$dx \cos \theta = -dz \quad [\text{Ec. 4}]$$

Se obtiene entonces:

$$-dpA + \rho g A dx \cos\theta - \tau_0 P dx = 0'' \quad [\text{Ec. 5}]$$

Despejando el esfuerzo cortante en la pared de la tubería se obtiene:

$$\tau_0 = \frac{A}{P} \frac{d}{dx} (p + \rho g z) \quad [\text{Ec. 6}]$$

O:

$$\tau_0 = \frac{A}{P} \frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \quad [\text{Ec. 7}]$$

Esta ecuación representa una forma general de las ecuaciones de pérdidas por fricción en el flujo a través de una tubería. Como se observa, es el resultado de una aplicación sencilla de la segunda ley del movimiento de Newton. En esta ecuación el término indicado a continuación representa la pendiente de fricción del flujo en la tubería, S_f :

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{p}{\rho g} + z \right) \quad [\text{Ec. 8}]$$

Por consiguiente, el esfuerzo cortante se puede expresar como sigue:

$$\tau_0 = \frac{A}{P} S_f \quad [\text{Ec. 9}]$$

Reemplazando A/P por el radio hidráulico, R , y el producto de la densidad y la gravedad por el peso específico del fluido se obtiene:

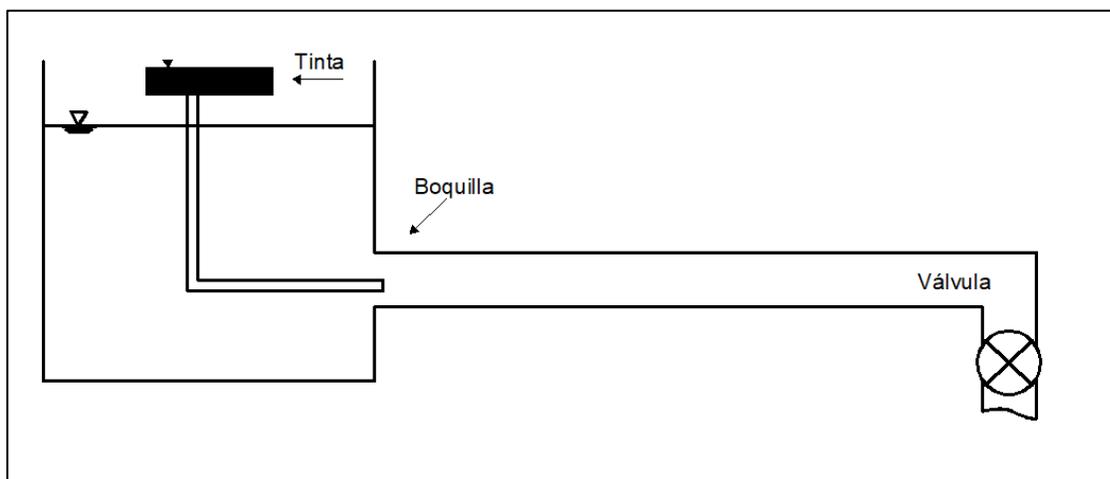
$$\tau_0 = \gamma R h S_f \quad [\text{Ec. 10}]$$

La ecuación anterior (Ec. 10) representa la forma inicial de una ecuación para explicar las pérdidas por fricción que experimenta un flujo a través de cualquier tipo de ducto, sea este una tubería, un canal, una alcantarilla, etcétera.

1.1.2. Experimento de Reynolds

“Históricamente se conocían dos tipos de flujo, los cuales se diferenciaban por su comportamiento en lo que concierne a las pérdidas de energía. En 1890, G.H.L. Hagen había establecido los principios y diferencias de estos dos tipos de flujos. Sin embargo, la correcta descripción y formulación sólo fue planteada entre 1880 y 1884 por Osborne Reynolds, de la Universidad de Cambridge, Inglaterra.”³

Figura 2. **Esquema del aparato utilizado por O. Reynolds para establecer el régimen del flujo en tuberías**



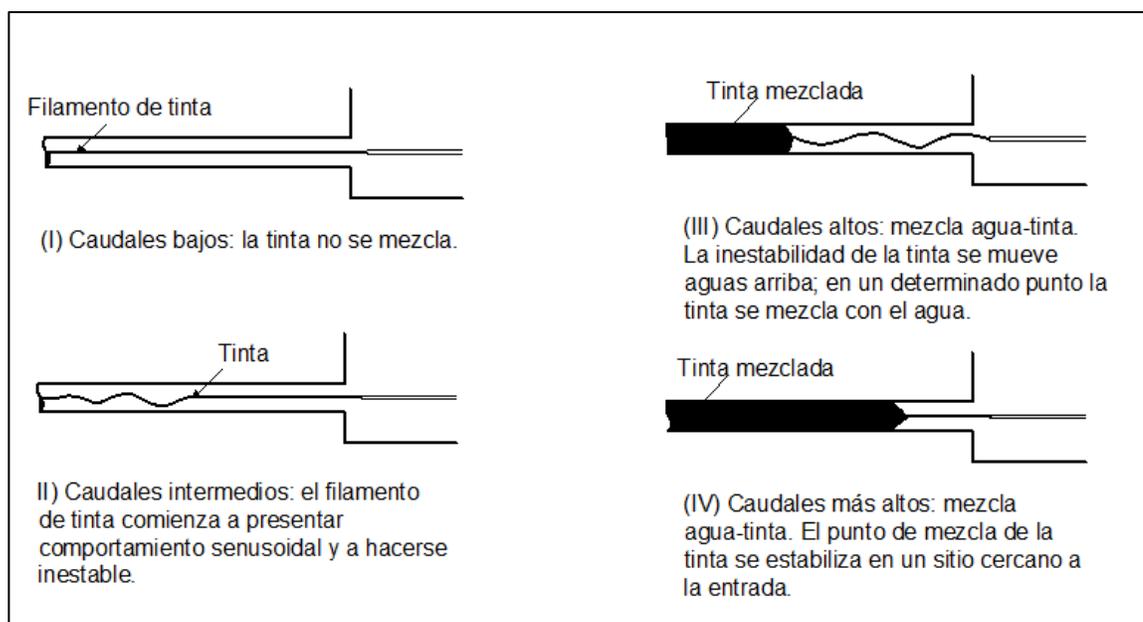
Fuente: SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 6.

³ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 5.

La figura 2 representa gráficamente el primer experimento de Reynolds. Para observar el cambio de flujo, utilizó tubos de vidrio de diferentes diámetros conectados a un gran tanque de agua. En la línea central de las tuberías, Reynolds inyectó tinta para visualizar los cambios experimentados por el flujo. El tamaño del tanque era el requerido para garantizar un flujo permanente en las tuberías y una turbulencia muy baja restante.

Al abrir la válvula, Reynolds observó que hay cuatro tipos de flujos, como se muestra en la figura 3, en los que se esquematiza el comportamiento de la tinta trazadora.

Figura 3. **Resultados del primer experimento de Reynolds**



Fuente: SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 6.

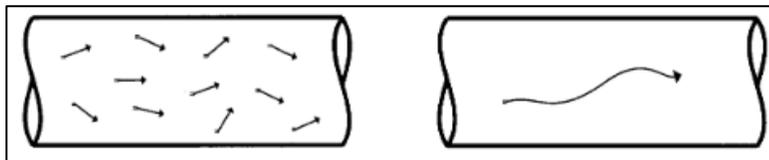
“Reynolds observó que al aumentar el caudal (aumento de velocidad), el punto de mezcla se corre aguas arriba. Eventualmente la zona de inestabilidad

desaparece. Sin embargo, si sigue aumentando el caudal (Q), el corrimiento del punto de mezcla llega hasta un máximo en donde se detiene; para todo Q existe una zona donde la tinta no se mezcla.”⁴ Osborne Reynolds definió los tipos de flujo de la siguiente manera:

- Flujo laminar: cuando la tinta no se mezcla. El flujo se mueve en capas sin intercambio de paquetes de fluido entre ellas (el intercambio molecular causante de la viscosidad de Newton sigue existiendo).
- Flujo turbulento: cuando la tinta se mezcla completamente. Se presenta intercambio de paquetes de fluido entre las capas que se mueven a diferente velocidad. Las partículas no tienen un vector velocidad muy definido. El flujo nunca es permanente; se debe hablar de una velocidad promedio (flujo cuasi-permanente).

El movimiento en el flujo turbulento es similar a lo mostrado en la figura 4, en la que representa; en primera instancia, los vectores velocidad de varias partículas en un instante dado (izquierda de la figura), los cuales pueden apuntar en cualquier dirección; y en segunda instancia, la trayectoria seguida por una determinada partícula (derecha de la figura).

Figura 4. **Flujo turbulento en tuberías**



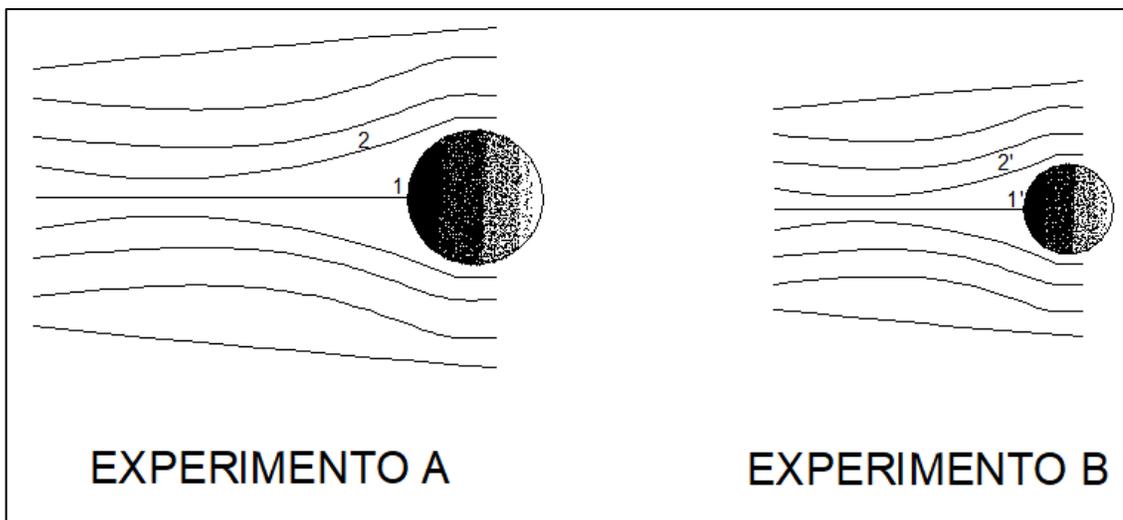
Fuente: SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 7.

⁴ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 7.

1.1.3. Número de Reynolds

“Reynolds repitió su experimento tanto con diferentes diámetros de tubería como con diferentes fluidos, encontrando resultados similares. Esto lo llevó a pensar que el fenómeno debía estar gobernado por las mismas leyes físicas; dedujo que, en un conjunto de experimentos como el suyo, si se quería reproducir las condiciones de uno de ellos”⁵, las condiciones de velocidad y de geometría tenían que ser iguales y debían ser medidas en sitios similares. Fue la primera persona que habló del concepto de similitud en mecánica de fluidos. Por consiguiente, las líneas de corriente debían ser similares.

Figura 5. **Flujos similares alrededor de esferas de diferentes tamaños**



Fuente: SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 8.

⁵ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 7.

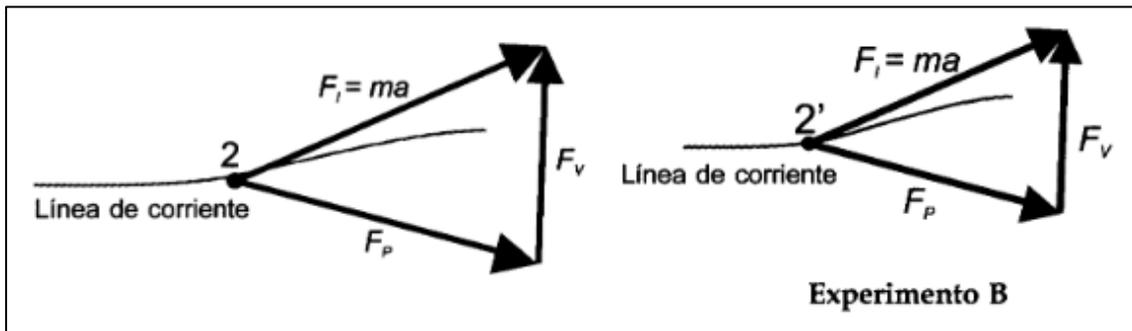
Para los dos campos de flujo mostrados en la figura 5, las líneas de corrientes son iguales, luego el movimiento de las partículas 2 y 2', por ejemplo, debe estar gobernado por fuerzas similares en los dos experimentos. En este caso, las fuerzas importantes para producir el movimiento de las partículas son:

- Las fuerzas de presión
- Las fuerzas viscosas
- Las fuerzas inerciales

Las fuerzas de tensión superficial no existen por no haber superficies de contacto gas-líquido o líquido-líquido y las fuerzas de compresibilidad son muy pequeñas porque la velocidad es sustancialmente inferior a la del sonido.

“Luego, las partículas 2 y 2' se puede establecer el siguiente triángulo de fuerzas:”⁶

Figura 6. **Triángulos de fuerzas para los puntos homólogos 2 y 2' de los flujos alrededor de las esferas similares**



Fuente: SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 7.

⁶ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 8.

Para que los dos triángulos de la figura 6 sean similares es necesario que dos de sus respectivos lados guarden la misma proporción; Reynolds consideró la relación entre fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales:

$$\frac{F_{I2}}{F_{v2}} = \frac{F_{I2'}}{F_{v2'}} \quad [\text{Ec. 11}]$$

Ahora, las fuerzas inerciales son iguales a la masa por la aceleración:

$$F_I = ma \quad [\text{Ec. 12}]$$

$$v = \frac{ds}{dt} \text{ entonces } dt = \frac{ds}{v} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Donde:

- m = masa
- a = aceleración
- v = velocidad
- t = tiempo
- s = espacio

Luego, es claro que la aceleración es proporcional a:

$$a = v \frac{dv}{ds} \propto \frac{v^2}{L} \quad [\text{Ec. 14}]$$

Donde:

- v = velocidad significativa del flujo
- L = longitud significativa de la geometría del flujo

Ahora, la masa es proporcional a:

$$m = V\rho \propto \rho L^3 \quad [\text{Ec. 15}]$$

Donde:

- $V = \text{volumen}$

Por otro lado, “las fuerzas viscosas son iguales al esfuerzo cortante por el área que en éste actúa”⁷

$$F_v = \tau A \text{ en donde } \tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad [\text{Ec. 16}]$$

Donde:

- $\mu = \text{coeficiente de viscosidad dinámica, tal como lo establece la ley de viscosidad de Newton.}$

Por consiguiente, se tiene:

$$\frac{F_I}{F_V} = \frac{\rho v^2 L^2}{\mu v L} = \frac{v L \rho}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad [\text{Ec. 17}]$$

Donde:

- $\nu = \mu/\rho$ es la viscosidad cinemática. Para que los experimentos a y b sean similares deben cumplir que

⁷ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 9.

$$\left(\frac{vL\rho}{\mu}\right)_2 = \left(\frac{vL\rho}{\mu}\right)_{2'} \quad [\text{Ec. 18}]$$

La expresión adimensional $vL\rho/\mu$ que caracteriza los flujos gobernados por las fuerzas viscosas y las fuerzas de presión.

Este es el caso del flujo uniforme en tuberías. Reynolds utilizó como longitud significativa L el diámetro d de la tubería, encontrando que cuando vdp/μ alcanza un valor de 2 200, el flujo pasa de laminar a transición.

Para valores entre 2 200 y 4 500 aproximadamente, el flujo se localiza en una zona de transición y para valores mayores pasa a ser turbulento.

De esta manera, “Reynolds pudo analizar el cambio de flujo laminar a turbulento en una tubería; posteriormente reprodujo sus experimentos en ductos con diferentes áreas transversales. La expresión vdp/μ se conoce como el número de Reynolds (Re).”⁸

Sabiendo que $\nu = \rho/\mu$, entonces el número de Reynolds (Re) se puede definir como:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Donde:

- Re = número de Reynolds
- v = velocidad
- d = diámetro

⁸ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 10.

- ν = viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es una propiedad de un fluido que depende de la temperatura.

Tabla I. **Propiedades del agua**

Temperatura (°C)	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa*s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
0	9,81	1 000	1,75E-03	1,75E-06
5	9,81	1 000	1,52E-03	1,52E-06
10	9,81	1 000	1,30E-03	1,30E-06
15	9,81	1 000	1,15E-03	1,15E-06
20	9,79	998	1,02E-03	1,02E-06
25	9,78	997	8,91E-04	8,94E-07
30	9,77	996	8,00E-04	8,03E-07
35	9,75	994	7,18E-04	7,22E-07
40	9,73	992	6,51E-04	6,56E-07
45	9,71	990	5,94E-04	6,00E-07
50	9,69	988	5,41E-04	5,48E-07
55	9,67	986	4,98E-04	5,05E-07
60	9,65	984	4,60E-04	4,67E-07
65	9,62	981	4,31E-04	4,39E-07
70	9,59	978	4,02E-04	4,11E-07
75	9,56	972	3,73E-04	3,83E-07
80	9,53	971	3,50E-04	3,60E-07
85	9,50	968	3,30E-04	3,41E-07
90	9,47	965	3,11E-04	3,22E-07
95	9,44	962	2,92E-04	3,04E-07
100	9,40	958	2,82E-04	2,94E-07

Fuente: elaboración propia.

1.2. Ecuación de Darcy-Weisbach

La ecuación de Darcy-Weisbach es la ecuación que representa la resistencia fluida más general para el caso de tuberías circulares fluyendo a

presión, la cual es el resultado de aplicar las leyes físicas del movimiento de Newton. Fue establecida por Henry Darcy (1803-1858), utilizando experimentos de flujo en tuberías, los cuales se desarrollaron en Chaillot cerca de París desde el 3 de agosto de 1849 hasta el 27 de octubre de 1850. En esa época Darcy era el ingeniero jefe en el servicio municipal de París.

Los detalles de su investigación experimental, en conjunto con una presentación exhaustiva del estado del arte de las ecuaciones para el flujo en tuberías, pueden encontrarse en su *Mémoire* enviada por Darcy a la Académie Des Sciences en junio de 1854 y publicada en 1858.

Los experimentos llevados a cabo por Darcy incluyeron diámetros desde 0,0122 hasta 0,5 m, mientras que los materiales de las tuberías incluyeron vidrio, hierro recubierto con bitumen, hierro fundido y latón. Las condiciones de la pared variaron desde material nuevo hasta material usado con incrustaciones y velocidades promedio variaron en el rango de 0,03 hasta 6,01 m/s. La medición de los caudales se llevó a cabo por métodos volumétricos recolectando el agua en tanques aforados. Las longitudes de las tuberías fueron siempre superiores a 100 m, excepto para las tuberías de vidrio y de plomo, las cuales fueron 44,8 y 50 m, respectivamente. Las caídas en la altura piezométrica se midieron utilizando piezómetros, dejando de lado los primeros 4,7 m de tubería.

Después de observar detalladamente el fenómeno, Darcy propuso que los datos experimentales se ajustaban en forma apropiada a la siguiente ecuación:

$$RhS_f = av + bv^2 \quad \text{[Ec. 20]}$$

Donde:

- Rh = radio hidráulico
- S_f = pendiente de fricción
- v = velocidad media
- a, b = coeficientes que describen la edad y el material de la tubería

Para propósitos prácticos, se planteó la siguiente ecuación:

$$RhS_f = b_1 v^2 \quad [\text{Ec. 21}]$$

Donde:

- b_1 = coeficiente para la edad y el material de la tubería

“Con $\alpha = 0,000507$ y $\beta = 0,0000067$ para tubos de hierro fundido y diámetro hasta 0,5 m. La siguiente ecuación fue reescrita por Darcy para diámetros variando entre 0,01 y 1 m y las velocidades entre 0,1 y 3,0 m/s para tuberías de hierro.”⁹

$$b_1 = \alpha + \frac{\beta}{R} \quad [\text{Ec. 22}]$$

La siguiente ecuación es una de las piedras angulares en la historia de la hidráulica. J. T. Fanning (1837-1911) fue el primero en combinar los resultados experimentales de Darcy en la ecuación de Julius Weisbach (1806-1871). Así se pudo obtener una ecuación basada en la física, que a la vez se ajustaba enormemente a los datos experimentales.

⁹ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 45.

$$S_f = \left(0.00164 + \frac{0.000042}{d}\right) * \frac{Q^2}{d^5} \quad [\text{Ec. 23}]$$

Donde:

- Q = caudal
- d = diámetro de la tubería

El diseño en hidráulica requería una ecuación que predijera las pérdidas por fricción como función del fluido, la velocidad, el diámetro de la tubería y el tipo de material de esta. Weisbach, de nacionalidad sajona, propuso en 1845 la ecuación que se utiliza hoy en día, que se muestra a continuación:

$$hf = f \frac{L}{d^5} \frac{v^2}{2g} \quad [\text{Ec. 24}]$$

Donde:

- hf = pérdida de energía por unidad de peso (pérdida por fricción)
- f = factor de fricción de Darcy
- L = longitud del tramo de la tubería en la cual se pierde energía
- d = diámetro de la tubería
- v = velocidad media

“Cuando se trata de conductos cerrados simples, el único tipo de energía que puede perderse por razón del movimiento del fluido es la energía de presión, ya que la energía cinética debe permanecer constante si el área es constante, y la energía potencial sólo depende de la posición”¹⁰.

¹⁰ SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p. 45.

La energía de presión expresada como energía por unidad de peso del fluido tiene unidades de altura (metros). La pérdida de altura por fricción es la ecuación anterior (ecuación 24).

Tabla II. **Rugosidad absoluta (Ks) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías**

Material	Ks (mm)
Vidrio	0,0003
PVC, CVPC	0,0015
Asbesto cemento	0,03
GRP	0,03
Acero	0,046
Hierro forjado	0,06
CCP	0,12
Hierro fundido asfaltado	0,12
Hierro galvanizado	0,15
Arcilla vitrificada	0,15
Hierro fundido	0,15
Hierro dúctil	0,25
Madera cepillada	0,18-0,9
Concreto	0,3-3,0
Acero bridado	0,9-9

Fuente: elaboración propia.

Para determinar el valor f, se puede utilizar la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{K_s}{3,7d} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad [\text{Ec. 25}]$$

Donde:

- f = factor de fricción de Darcy
- Ks = rugosidad absoluta
- d = diámetro
- Re = número de Reynolds

1.3. Ecuación de Hazen-Williams

“La ecuación de Hazen-Williams es una de las más populares para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos. Su uso se limita al flujo de agua en tuberías con diámetros mayores a 2.0 pulgadas y menos a 6.0 pies. La velocidad del flujo no debe exceder los 10.0 pies/s. De igual manera, está elaborada para agua a 60°F. Su empleo con temperaturas mucho más bajas o altas ocasionaría cierto error.”¹¹

“La fórmula de Hazen-Williams es específica en cuanto a las unidades. En el sistema internacional de unidades es la siguiente:”¹²

$$v = 0,85C_h Rh^{0,63} s^{0,54} \quad [\text{Ec. 26}]$$

Donde:

- v = velocidad promedio del flujo (m/s)
- C_h = coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)
- R_h = radio hidráulico del conducto de flujo (m)
- s = relación h_p/L : pérdida de energía / longitud del conducto (m/m)

Existe un arreglo de esta ecuación en la cual se obtiene la pérdida de energía (h_p) en función de las demás variables y es la siguiente:

$$hf = \frac{1743.811 * L * Q^{1.85}}{D^{4.87} * C_h^{1.85}} \quad [\text{Ec. 26}]$$

Donde:

- L = longitud en metros

¹¹ MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. p. 243.

¹² *Ibíd.*

- Q = caudal en L/s
- D = diámetro en pulgadas
- C_h = coeficiente dependiendo del material

Esta ecuación es un tanto diferente a la original dado a que los valores como el diámetro y el caudal no están en las dimensionales del sistema internacional, sino que estas están en otras dimensionales, debido a que cuando se cotiza una tubería, esta unicamente se encuentra en el mercado en pulgadas y el caudal por comodidad de algunos, se utiliza en litros sobre segundo (esto para el caso guatemalteco). Esto hace que a la ecuación se le aplique un factor modificador para que las dimensionales sean congruentes, de tal forma que para el cálculo, se pueda ingresar el diámetro en pulgadas y el caudal en litros sobre segundo, y el resultado del valor de pérdida esté en dimensionales de metros.

“El coeficiente C_h unicamente depende la superficie de la tubería o del conducto.”¹³

Tabla III. **Coeficientes Hazen-Williams, C_h .**

Tipo de tubo	C_h	
	Promedio para tuberías nuevas y limpias	Valor de diseño
Acero, hierro dúctil o fundido con aplicación centrífuga de cemento o revestimiento bituminoso	150	140
Plástico, cobre, latón, vidrio	140	130
Acero, hierro fundido, sin recubrimiento	130	100
Concreto	120	100
Acero corrugado	60	60

Fuente: elaboración propia.

¹³ MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. p. 244.

2. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE ACUEDUCTOS O SISTEMAS DE ABASTECIMIENTOS DE AGUA POTABLE

Como segunda parte fundamental del presente trabajo de investigación se requiere conocer los parámetros generales para diseñar sistemas de abastecimiento de agua potable que deben tomarse en consideración para una adecuada planificación.

2.1. Levantamiento topográfico

La topografía del lugar es de suma importancia para el diseño de acueductos, dado que se debe conocer a qué distancia se encuentra la fuente, los desniveles del lugar, entre otros, para de esa manera definir dónde colocar la tubería, dónde localizar las obras de arte como tanques de distribución, cajas de válvulas, pasos aéreos, entre otros.

2.1.1. Planimetría

En la planimetría se determinan las líneas de conducción y distribución con poligonales abiertas, realizando radiaciones hacia los puntos de interés. Las redes de distribución se deben realizar a través de poligonales cerradas.

2.1.2. Altimetría

En la altimetría hay que considerar nivelaciones de distancias de las líneas de conducción y distribución; sin embargo, uno de los aspectos importantes es que para realizar esta actividad deben considerarse distancias no mayores a

250 metros. En los puntos de interés como las obras de arte, se recomienda levantar topográficamente las curvas de nivel.

2.2. Período de diseño

Corresponde al tiempo en el cual el sistema funcionará de forma satisfactoria. Existen algunos factores que influyen en el período de diseño y son los siguientes:

- Vida útil de los materiales y equipo
- El acertado pronóstico de la población
- Facilidades de ampliación del sistema
- Costos de conexión y tarifas

2.3. Estimación de población futura

La población que al final hará uso del proyecto de sistema de abastecimiento de agua potable se deberá calcular a través de predicciones o pronósticos, debido a que la población inicial (determinada a través de censos, fuentes primarias o secundarias, entre otros), irá creciendo en el tiempo; por consiguiente, se afectará el diseño original de un proyecto si se toma como parámetro la población actual. Para predecir la población futura, se debe realizar el siguiente cálculo:

$$Pf = P_i + (N + I) - (D + E) \quad [\text{Ec. 28}]$$

Donde:

- Pf = población futura a “n” años

- P_i = población inicial
- N = nacimiento durante 'n' años
- I = inmigración durante 'n' años
- D = defunciones durante 'n' años
- E = emigración durante 'n' años

La mayoría de estos datos se torna difícil de calcularlos debido a que no se lleva un registro cuidadoso y riguroso, de tal forma que los métodos gráficos o analíticos con base matemática son útiles para estimar la población futura.

Los modelos matemáticos para la estimación de la población futura se plantean en función de la información que se pueda obtener y estos pueden ser:

- Analíticos
- Geométricos

Cuando los datos que se tienen son confiables pueden aplicarse los métodos analíticos. Los más comunes que se utilizan son los siguientes:

- Geométrico
- Aritmético
- Parabólico
- Logístico

Ahora bien, si el número de datos que se tienen son suficientes para acomodarlos en una curva, se aplican los métodos gráficos. Estos son:

- Proyección a ojo
- Proyección comparada

2.3.1. Método geométrico

“Para una proyección de la población futura puede utilizarse varios métodos uno de ellos el método geométrico y cotejarse los resultados con el objetivo de obtener un valor más apegado a la realidad. Deberá justificarse la tasa de crecimiento adoptada.”¹⁴

Este método “es el modelo que más se adecua para las poblaciones que se encuentran en vías de desarrollo.”¹⁵

Su fórmula es la siguiente:

$$P_f = P_i(1 + R)^n \quad [\text{Ec. 29}]$$

Donde:

- P_f = población futura o población al transcurrir el período de diseño
- P_i = población inicial o población actual del lugar
- R = tasa de crecimiento geométrico
- n = periodo de diseño

2.4. Consumo de agua

Los factores que afectan el consumo de agua son:

- Temperatura: debido a las condiciones propias de la actividad del ser humano, entre mayor sea la temperatura, mayor será el consumo de agua. Por ejemplo, en climas cálidos se beberá más agua, el aseo

¹⁴ INFOM. *Guía de normas sanitarias para el diseño de sistemas rurales de abastecimiento de agua para consumo humano*. p. 25.

¹⁵ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 41.

personal será más frecuente, se emplean sistemas de aire acondicionado y el riego de jardines será más intensivo.

- Calidad del agua: el consumo de agua será mayor en la medida en que las personas tengan la seguridad de una buena calidad de agua. Lo anterior es válido para el sector doméstico e industrial.
- Características socioeconómicas: el consumo de agua depende también en buena parte del nivel de educación y de nivel de ingresos de la población. Por esta razón en ciudades desarrolladas, el consumo de agua es mayor que en los pueblos o caseríos.
- Servicio de alcantarillado: el hecho de disponer de una red de alcantarillado incrementa el consumo de agua potable, en comparación con sistemas de letrinas, o donde no exista ningún sistema para evacuar excretas.
- Presión en la red de distribución de agua: si se tienen altas presiones en la red, se presentarán mayores desperdicios en el consumo doméstico al abrir las llaves de los lavamanos, regaderas, chorros etc. Igualmente se pueden presentar un mayor número de rupturas de tubos dentro del domicilio o en la misma red de distribución, aumentando así el volumen de agua perdida.
- Administración: una administración eficiente controlará mejor el consumo de agua reduciendo las fugas y desperdicios, y vigilando las conexiones ilícitas.
- Medición y tarifa: el costo del agua es un factor importante en el consumo y de éste dependerá el uso racional del servicio y el evitar desperdicios.¹⁶

2.5. Factores de consumo

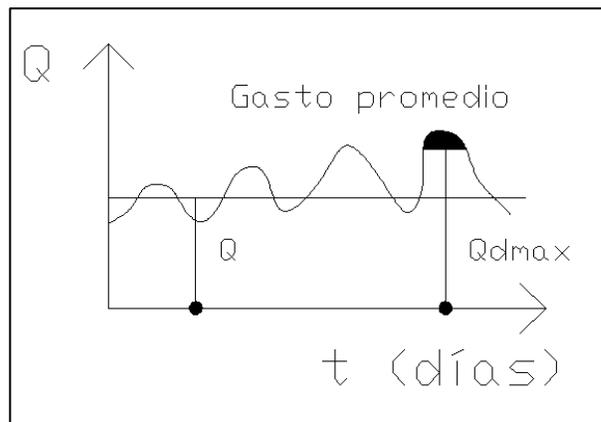
Los factores de consumo funcionan como una especie de factor de seguridad para el cálculo de los caudales de diseño, puesto que el consumo del vital líquido por la población no es de forma uniforme, sino que hay altos y bajos en el consumo de acuerdo con las horas o los días, dependiendo de sus actividades económica-productivas. A continuación, se describen los factores utilizados para el cálculo de los caudales de diseño.

¹⁶ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 48-49.

2.5.1. Factor día máximo

Durante los días de un mes o año específico, el consumo de agua en una población determinada no se presenta de forma uniforme, es decir, el caudal que se extrae para el consumo humano no es riguroso distribuido equitativamente y por horarios entre todos los beneficiarios, sino que en ciertos días puede haber un sobreuso del agua y en otros días puede que no haya algún consumo relativamente grande. De acuerdo con la figura 7, “hay días en el año en que los consumos son máximos y en otros son mínimos”¹⁷, debido a diferentes circunstancias.

Figura 7. Gráfica del desvío del caudal promedio diario



Fuente: elaboración propia.

Por la figura 7, se establece que:

$$f_{dm} = \frac{Q_{\text{máximo diario}}}{Q_{md}} \quad [\text{Ec. 30}]$$

¹⁷ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 49.

Donde:

- f_{dm} = factor día máximo, también llamado factor máximo diario
- $Q_{máximo\ diario}$ = caudal máximo diario (L/s)
- Q_{md} = caudal medio diario (L/s)

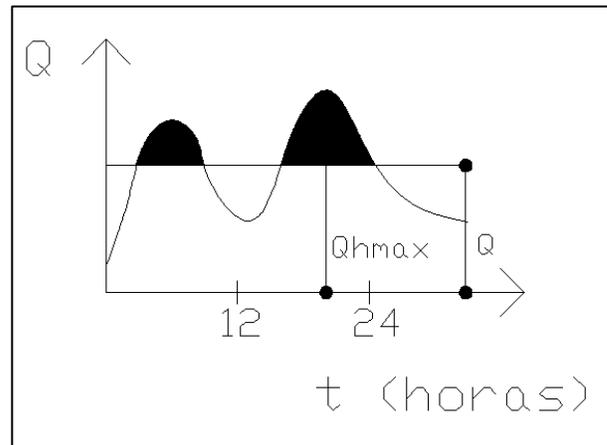
“El factor de día máximo se usará pequeño cuando las poblaciones sean muy grandes y se utilizará un factor grande cuando las poblaciones sean pequeñas, ya que el mismo es para prever el uso simultáneo del servicio. Este se usará para determinar el caudal de conducción.”¹⁸

2.5.2. Factor hora máximo

Al igual que el factor día máximo, el factor hora máximo (f_{hm}) se toma como un factor compensador de las variaciones críticas que pueden presentarse en una hora específica del día. En la gráfica siguiente se puede notar que durante el día hay horas en que los consumos son máximos, debido al uso simultáneo del servicio por parte de la mayoría de los habitantes de una comunidad.

¹⁸ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 50.

Figura 8. **Gráfica del desvío del caudal promedio horario**



Fuente: elaboración propia.

$$fmh = \frac{Q_{\text{máximo horario}}}{Q_{mh}} \quad [\text{Ec. 31}]$$

Donde:

- fmh = factor hora máximo, también llamado factor máximo horario
- $Q_{\text{máximo horario}}$ = caudal máximo horario (L/s)
- Q_{md} = caudal medio diario (L/s)

“El factor de hora máximo se usará pequeño cuando las poblaciones sean muy grandes y se utilizará un factor grande cuando las poblaciones sean pequeñas, ya que el mismo es para prever el uso simultáneo del servicio. Éste se usará para determinar el caudal de distribución.”¹⁹

¹⁹ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 51.

2.6. Caudales de diseño

Los caudales de diseño representan los consumos que se toman en cuenta para el dimensionamiento de las tuberías y obras hidráulicas en cada componente de un sistema de abastecimiento de agua, los cuales a su vez están en función de la información básica, aforo y el estudio de población.

2.6.1. Dotaciones

La dotación corresponde a “una cantidad (volumen por unidad de tiempo) asignada a la unidad consumidora (habitante, cama de hospital, área de riego, lavado, etcétera, y está expresada en litros por habitante por día. (L/hab/día). “Para fijar la dotación, hay que tomar en cuenta los estudios de demanda para la población o de poblaciones similares, si los hubiere”.²⁰ Si no se ha realizado ninguno, el diseñador debe buscar según su criterio que normas de diseño de abastecimiento se adecuan al proyecto para asignar dotaciones.

2.6.2. Caudal medio diario

El caudal medio diario se representa como “el producto de multiplicar la dotación adoptada por el número de habitantes que se hayan estimado para el final del período de diseño, dividido entre el número de segundos que tiene un día.”²¹

$$Q_{md} = \frac{\text{dotación} * \text{población}}{86400} \quad [\text{Ec. 32}]$$

²⁰ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 52.

²¹ *Ibíd.* p. 53.

2.6.3. Caudal máximo diario

Primeramente se debe establecer “si existe un registro de este parámetro para la población específica; caso contrario se deberá considerar como el producto del caudal medio diario por un factor que va de 1,2 a 1,5 para poblaciones futuras menores de 1 000 habitantes y de 1,2 para mayores de 1000 habitantes. Se deberá justificar el factor que se haya seleccionado. El consumo de agua no es igual en un día de verano como en un día de invierno. El factor f_{dm} aumenta el caudal medio diario de un 20 % a 50 % considerando el posible aumento del caudal, es decir su variación en un día promedio.”²²

$$Q_{max.diario} = f_{dm} * Q_{md} \quad [Ec. 33]$$

2.6.4. Caudal máximo horario

Se deberá obtener el caudal máximo horario a través de la multiplicación del caudal medio diario por un factor que varía entre 2,0 a 3,0 para poblaciones menores de 1 000 habitantes y de 2 para poblaciones futuras mayores de 1 000 habitantes. La selección del factor es inversamente proporcional al número de habitantes a servir.

“Se deberá justificar el factor que se selecciona. El consumo de agua varía considerablemente dependiendo de la hora del día; por ejemplo, la demanda de caudal será mínima a las 12 de la noche, pero será un máximo a las 6 de la mañana. El factor máximo horario considera estas variaciones que pueden suscitarse en el consumo de agua.”²³

²² INFOM. *Guía de normas sanitarias para el diseño de sistemas rurales de abastecimiento de agua para consumo humano*. p. 27.

²³ *ibíd.* p. 28

$$Q_{max.horario} = fhm * Q_{md} \quad [Ec. 34]$$

2.7. Presiones máximas y mínimas

“La presión hidrostática máxima en líneas de conducción y de distribución debe ser menor que la presión de trabajo de la tubería a utilizar, aunque hay que tomar en cuenta la calidad de los accesorios y las válvulas, para evitar fugas cuando el acueducto esté en servicio.”²⁴

Las presiones en las redes de distribución dependerán de las cotas que se hayan obtenido de la altimetría topográfica. En general, las presiones en las redes de distribución tendrán los siguientes valores:

- Presión mínima 10 metros (presión de servicio)
- Presión máxima 40 metros (presión de servicio)

2.8. Tipos y clases de tuberías

Las tuberías normadas, que son distribuidas o comercializadas en Guatemala se distinguen a través de tres características fundamentales, las cuales son: el diámetro, la clase y el tipo de tubería.

- Con respecto al diámetro, se debe mencionar que comercialmente a cada tubería se le asigna un diámetro nominal que no es el mismo diámetro interno del conducto.
- La clase de tubería se refiere a la norma que se usó para su fabricación, íntimamente relacionada con la presión de trabajo; también indica la razón entre el diámetro externo y el espesor de la pared de la tubería.

²⁴ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 54.

- Por último el tipo de tubería se refiere al material de que está fabricada. Los materiales más comunes usados para las tuberías de acueductos son el cloruro de polivinilo (PVC) y el acero galvanizado (H.G.).²⁵

²⁵ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 55.

3. PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN, LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN Y REDES DE DISTRIBUCIÓN

Una vez se ha conocido los parámetros de diseño para los sistemas de abastecimiento de agua potable, así como el marco referencial de cómo se obtuvieron las fórmulas o ecuaciones de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, descritos en los dos acápites anteriores, se procederá a definir el procedimiento general de diseño de líneas de conducción y distribución para un acueducto.

3.1. Líneas de conducción

Las líneas de conducción se refieren al conjunto integrado por tuberías, estaciones de bombeo, accesorios y válvulas, cuyo objetivo es transportar el agua procedente de la fuente de abastecimiento (a partir de una obra de captación) hasta el sitio donde se localiza el tanque de almacenamiento o distribución, planta potabilizadora o directamente a la red de distribución.

La conducción desde la captación hasta un reservorio se puede efectuar de dos maneras, dependiendo de la ubicación de la fuente de abastecimiento con respecto a las obras de regularización:

- Si la fuente de abastecimiento se encuentra en un nivel topográfico arriba del tanque de almacenamiento, la conducción se realizará por gravedad, ya sea trabajando como canal (sin presión), o como tubo a sección llena (a presión); este último es el más común en las obras de abastecimiento de agua potable.

- Si la fuente de abastecimiento se encuentra a un nivel topográfico debajo del tanque de regularización, la conducción se realiza por bombeo.

“Se puede clasificar las líneas de conducción en los siguientes grupos: por gravedad, por bombeo, y una combinación de ambas (mixta)”.²⁶

3.1.1. Tipos de líneas de conducción

“Hay dos regímenes de conducción, que pueden ser, régimen libre que se utiliza mediante canales o túneles y el régimen forzado, que es el de conducción por gravedad o por bombeo. Estos dos últimos son los más utilizados para transportar el agua hacia los tanques de almacenamiento. Aunque es preferible utilizar la conducción por gravedad, ya que su costo es mucho más económico.”²⁷

- Conducciones libres: en las líneas de conducción libres hay que seguir los siguientes criterios para un diseño adecuado:
 - El diámetro mínimo a usar será de 6” o su equivalente en secciones no circulares.
 - Las velocidades deben estar comprendidas entre 0,6 y 3,0 m/s.
- Conducciones forzadas: de igual forma que en las conducciones libres, hay que seguir ciertas normas, las que se indican en seguida:
 - Se recomienda usar un diámetro mínimo de 1½”.

²⁶ RODRÍGUEZ RUÍZ, Pedro. *Abastecimiento de agua*. p. 118.

²⁷ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 67.

- Atendiendo razones económicas se puede aceptar diámetros de $\frac{3}{4}$ ".
- Si se trata de agua con material en suspensión sedimentable o erosivo, la velocidad mínima debe de ser mayor de 0,4 m/s y menor de 3,0 m/s.
- Si es agua sin material sedimentable o erosivo no hay límite mínimo y el máximo se fijará solamente de acuerdo a la sobre presión del golpe de ariete y en ningún caso mayor a 5 m/s.
- La tubería debe enterrarse a una profundidad mínima de 0,80 metros sobre la corona (nivel superior del tubo).
- Para tuberías instaladas bajo calles de tránsito, la profundidad de colocación se calculará en función de las cargas vivas y muertas, el tipo de suelo y la tubería a usar. En estos casos la profundidad de colocación no será menor de 1,20 m.
- En terrenos inclinados, la tubería deberá protegerse mediante la construcción de muros que eviten el deslave.
- En los puntos más bajos y en los cruces de corrientes, se podrá dejar la tubería aérea, para tal efecto se usará tubería metálica.
- Se deben instalar válvulas de aire, ventosas o chimeneas en los puntos más altos.
- Deben instalarse válvulas de limpieza en los puntos más bajos.
- Se instalarán cajas-rompe presión con el objeto de que la máxima presión estática no exceda la presión de trabajo de la tubería.
- De ser necesario se construirán anclajes en los cambios de dirección.²⁸

Es importante hacer mención de la diferenciación entre las presiones de diseño para un acueducto:

²⁸ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 69.

- La presión estática se produce cuando todo el líquido en la tubería y en el recipiente que la alimenta está en reposo (presión hidrostática).
- La presión dinámica se produce cuando hay flujo de agua, la presión estática modifica su valor disminuyéndose por la resistencia o fricción de las paredes de la tubería.

“La cota piezométrica es la máxima presión dinámica en cualquier punto de una línea de conducción o distribución que alcanzaría una columna de agua si en dicho punto se colocara un manómetro. Es equivalente a la cota de superficie del agua en el punto de salida, menos la pérdida de carga por fricción que ocurre en la distancia que los separa.”²⁹

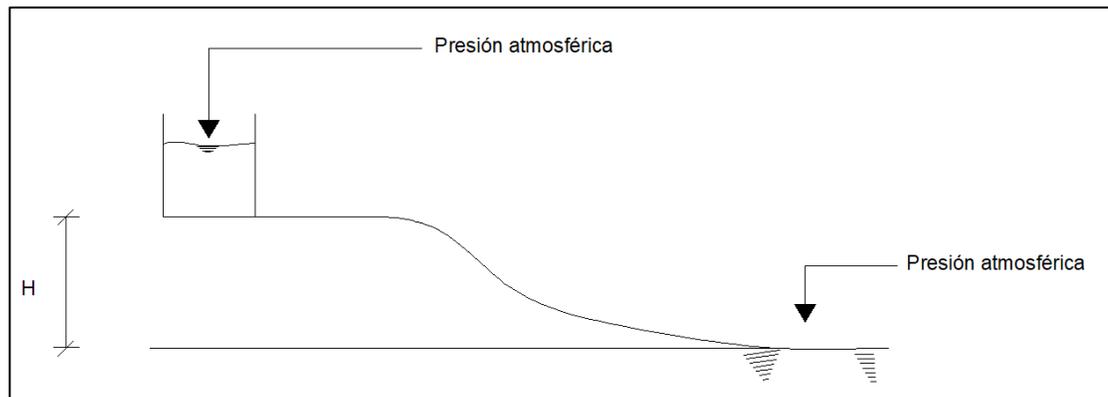
Por consiguiente, los valores de presión estática y dinámica se van alternando en los diseños de sistemas de abastecimiento de agua potable, que a su vez definen las cotas de la línea piezométrica (líneas de máxima presión dinámica).

3.2. Líneas por gravedad (de conducción y de distribución)

En cuanto al diseño de líneas de conducción o líneas de distribución por gravedad se deben determinar las longitudes y los diámetros para poder ajustar las pérdidas a las alturas disponibles.

²⁹ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 70.

Figura 9. **Conducción por gravedad**



Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 71.

Aplicando la ecuación de Bernoulli (ecuación de la energía, considerando pérdidas), se tiene:

$$H + P_a - P_b + \frac{v^2}{2g} = S \text{ pérdidas} \quad [\text{Ec. 35}]$$

demasiado pequeño = 0

$P_a - P_b = 0$ (ambos puntos de análisis están abiertos y sujetos a la presión atmosférica), por lo que se obtiene que $H + 0 + 0 =$ sumatoria de pérdidas.

Esto permite decir que $H = S \text{ pérdidas}$, de acuerdo con la figura 9.

Se dispone de una altura H, la cual es igual a la sumatoria de todas las pérdidas en la línea de conducción. Existen varios tipos de pérdidas en una línea de conducción, como la pérdida por fricción provocada por el roce del agua con la tubería, las pérdidas menores que son producidas por los accesorios, la entrada de agua y su descarga.

Con el fin de realizar un diseño de una línea de conducción o una línea de distribución por gravedad es necesario tener el caudal que viene del análisis previo (descrito en los subacápites anteriores). Para el cálculo de la línea de conducción se debe utilizar el caudal de día máximo de acuerdo con las ecuaciones 31 y 32, que representa el cálculo del caudal horario máximo, se utiliza para la línea de distribución.

Las longitudes de la tubería, al igual que las alturas de las cotas donde se colocarán las tuberías, se determinan en el levantamiento topográfico. “Es importante tomar en consideración que las distancias son horizontales, mientras que en la realidad al estar enterradas las tuberías éstas siguen la pendiente del terreno, de manera que la longitud real es mayor, por lo tanto, como seguridad adicional, se recomienda afectar la longitud por un factor que varía entre el cinco y el diez por ciento.”³⁰

Para una línea de conducción o una línea de distribución, se debe considerar que es necesario unir dos diámetros, uno grande y el otro menor, para que las pérdidas sean iguales a las alturas disponibles. Para ello se debe determinar cuál es la longitud de tubería para cada uno de ellos. Eso se puede determinar con una relación de triángulos como la que se muestra a continuación.

³⁰ AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 72.

$$L1 = L - L2 \quad [\text{Ec. 38}]$$

Para crear el diseño de una línea de conducción o una línea de distribución, es indispensable determinar los diámetros con los que se trabajará, para luego calcular las pérdidas con los diámetros antes encontrados. Estas pérdidas se pueden determinar a través de la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación 24) o con la ecuación de Hazen-Williams (ecuación 27).

3.2.1. Cálculo del diámetro en una tubería

Para conocer el diámetro de la tubería a utilizar, los datos de relevancia son la longitud, y la caída de la línea piezométrica o pérdida que en este caso se toma el valor de las diferencias de nivel entre un punto y otro.

- Ecuación de Darcy-Weisbach

Para obtener el diámetro, se debe utilizar la ecuación 24, despejando de esta el valor que se desea conocer; sin embargo, al estar elevado a la quinta, como se conoce matemáticamente, se obtendrán 5 raíces o 5 resultados que hacen verdad la ecuación; no obstante, se selecciona el valor más lógico dado a que pueden existir resultados de números negativos o números complejos. Teniendo el resultado se aproxima a un diámetro comercial ya que en el mercado guatemalteco, solo existen tuberías con diámetros de 1", 1 1/2", 2", 2 1/2", 3", 4", 6", 8", 10", 12".

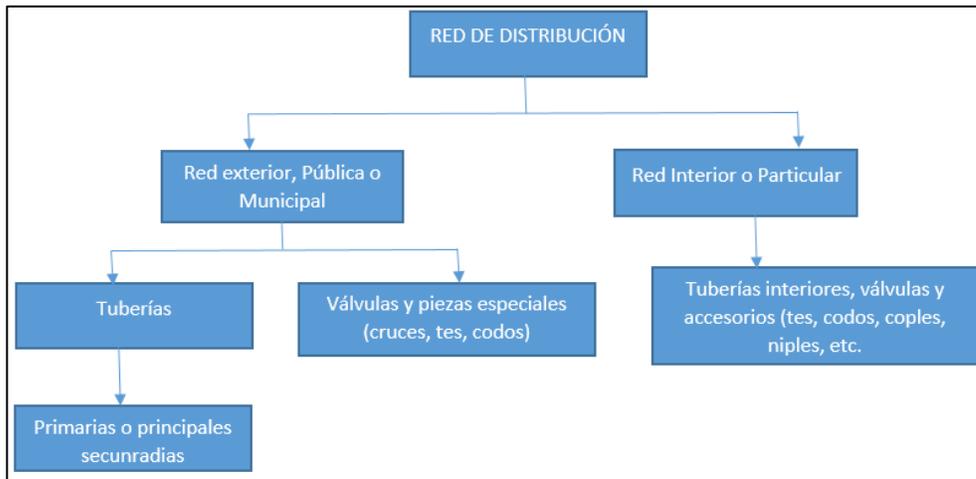
- Ecuación de Hazen-Williams

Se utiliza la ecuación 27, despejando el diámetro y se deja en términos de los demás valores que son conocidos. De esta forma se obtiene un diámetro teórico el cuál se debe aproximar a un diámetro comercial (al igual que en la aplicación de la ecuación de Darcy-Weisbach), ya que en el mercado guatemalteco solo existen tuberías con diámetros de 1", 1 1/2", 2", 2 1/2", 3", 4", 6", 8", 10", 12".

3.3. Redes de distribución

La red de distribución de agua potable se conforma por un grupo de tuberías con el fin de proporcionar agua al consumidor. La distribución empieza en el tanque de abastecimiento y las tuberías que están integradas en el mismo son de diferentes diámetros, que van enterrados en la vía pública, quiere decir en terrenos propiedad del municipio (no se recomienda en terrenos de propiedad particular), a los que se conectan tuberías de pequeños diámetros para abastecer a los edificios de agua.

Figura 11. Partes que comprende una red de distribución



Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Requerimientos

Un sistema de abastecimiento de agua potable posee una serie de objetivos que se traducen en requisitos al proyectar y ejecutar obras correspondientes a la red de distribución de agua potable, siendo estos los siguientes:

- Proporcionar agua inocua y sana a todos los usuarios. Al respecto, el agua absolutamente pura no se encuentra en la naturaleza. Cuando el vapor de agua se condensa en el aire y cae en forma de lluvia, absorbe polvo y disuelve oxígeno, anhídrido carbónico y otros gases. En la superficie del suelo recoge fango y otras impurezas. Las aguas se infiltran en el terreno pierden por diversas causas el fango y algo de impurezas, sin embargo, pueden adquirir nuevas alteraciones por la disolución de sales que al circular encontrará a su paso, dependiendo su cuantía y carácter, de la longitud del recorrido y de la composición de los estratos atravesados.³²

³² RODRÍGUEZ RUÍZ, Pedro. *Abastecimiento de agua*. p. 274.

- Suministrar agua en cantidad suficiente a todos los usuarios. Como ya se mencionó, la red debe ser proyectada para satisfacer las demandas máximas en las horas de mayor consumo. Para cumplir este requisito se necesita cuantificar los consumos de carácter ordinario (doméstico, comercial, industrial, pérdidas y desperdicios) y los de carácter extraordinarios (incendios, mantenimiento del sistema, entre otros).
- Presión requerida en todas las zonas por abastecer. En una red de distribución se recomienda mantener las presiones en cualquier punto de esta y deberán ser suficientes para proporcionar una cantidad de agua razonable en los pisos más altos de las casas, edificios y fábricas de altura media. La presión será proporcionada por la posición topográfica del tanque de abastecimiento, por el bombeo o por ambas, según el caso y deberá calcularse con relación al nivel de la calle en cada cruce de las tuberías primarias o principales, admitiéndose como presión mínima 15 m.c.a de carga dinámica y como máximo 50 m.c.a de carga estática para los puntos más bajos y alejados del tanque. Para comunidades pequeñas se admite una presión mínima de 10 m.c.a y para comunidades rurales es factible admitir una presión mínima de 8 m.c.a. Cuando el servicio se extiende a zonas con predios dispersos en localidades pequeñas, se adoptarán presiones disponibles de 10 m.c.a hasta 5 m.c.a en los extremos de las líneas abiertas; y si el abastecimiento es proporcionado por medio de hidrantes de toma pública, las presiones recomendables son de 2,5 m.c.a hasta 3 m.c.a. En todos los casos la presión de operación máxima admisible no deberá sobrepasar 45 m.c.a. y 50 m.c.a.
- Costo accesible a la economía de los usuarios. La red de distribución representa en la mayoría de los casos un elevado porcentaje del costo

total de las obras que integran el abastecimiento. Es deseable que los importes que tenga que pagar cada usuario sean suficientemente cómodos, de manera que no se lesione su economía. Un estudio cuidadoso de tarifas será el que dictamine el costo por metro cúbico de agua para los diferentes consumos

- Servicio continuo. Cuando un abastecimiento presenta interrupciones en el servicio, “los consumos son mayores debido a los incrementos por efectos de desperdicio, por lo tanto, es conveniente evitar las intermitencias que siempre van en contra de la buena distribución del agua.”³³

3.3.2. Información requerida para el diseño de una red

Llevar a cabo el proyecto de una red de distribución requiere de una serie de planos e informaciones complementarias, que, en conjunto, dependiendo de su cuantía, contenido, actualización, permitirán que el ingeniero proyectista realice los trabajos respectivos con mayor o menor apego a las necesidades reales de la localidad en cuestión. En síntesis, la información requerida se puede resumir en los siguientes puntos:

3.3.2.1. Información acerca del servicio actual de agua potable

- Plano de la red existente, indicando escala, nombre de las calles, longitudes, diámetros y clase de tubería, localización de válvulas de seccionamiento, número de tomas domiciliarias con medidor o sin medidor, hidrantes de toma pública y contra incendios, entre otros.

³³ RODRÍGUEZ RUÍZ, Pedro. *Abastecimiento de agua*. p. 275.

- Estado de conservación de cada parte y grado de aprovechamiento. También deberán señalarse.
- Las presiones manométricas (de trabajo) medidas en las horas de máximo y mínimo consumo en diferentes puntos de la red.

3.3.2.2. Información requerida para el proyecto

- Plano topográfico de la población, debidamente actualizados, a escala 1:2000 a 1:5000 señalando nombre de las calles, longitud entre cruceos de calles y elevación topográfica de cada cruceo.
- Plano con las distintas zonas de población en cuanto a su densidad, además la localización de industrias.
- Plano de pavimentos y banquetas señalando tipo (concreto, adoquín, empedrado, asfalto, tierra, entre otros).
- Número de tomas nuevas inmediatas y futuras, número de medidores para las tomas, números de hidrantes de toma pública.

3.3.2.3. Información adicional

- Planos de otros tipos de servicios públicos, tales como red de alcantarillado, alumbrado, gas, teléfonos.

- Datos básicos del proyecto. “Los datos básicos para elaborar el proyecto de la red son:”³⁴
 - Población de proyecto y/o futura
 - Dotación
 - Gasto

3.3.3. Tipos de redes de distribución

Dependiendo la topografía (altimetría y la planimetría de la localidad), el gasto por distribuir (en todos los casos debe ser el gasto máximo para la hora de mayor consumo), la ubicación del tanque de regularización en relación con la superficie del suelo y la propia red, así como la procedencia del agua, la distribución puede adoptar diferentes tipos y formas.

En cuanto a los tipos, es la planimetría de la localidad un factor predominante para la selección, jugando la topografía de la zona también un papel importante al respecto.

3.3.3.1. Tipos de redes adoptables

- Red abierta o ramificaciones sucesivas. “Consiste básicamente de una tubería principal que se instala en la zona de mayor consumo, disminuyendo de diámetro a medida que se aleja de la fuente o del tanque de regularización, de esta tubería parten otras de menor diámetro llamadas secundarias o de relleno para completar la red, esta red tiene la forma de esqueleto de pescado.”³⁵

³⁴ RODRÍGUEZ RUÍZ, Pedro. *Abastecimiento de agua*. p. 276.

³⁵ *Ibíd.* 277.

- “Redes cerradas de circuitos o de circulación continua. Es el conjunto de tuberías que se instalan subterráneamente en las calles de una población y de las que se derivan las tomas domiciliarias que entregan el agua en la puerta de la casa del usuario. Está formada por tuberías principales, llamadas también de circuitos y por tuberías secundarias o de relleno que son las que se derivan de las primeras.”³⁶

³⁶ RODRÍGUEZ RUÍZ, Pedro. *Abastecimiento de agua*. p. 287.

4. MARCO PRÁCTICO

Para el desarrollo del marco práctico, se requerirá de la información vertida en las siguientes tablas.

Tabla IV. Especificaciones para tubería ASTM D-2241 (PVC)

Diámetro Nóminal		SDR	Presión trabajo		Largo en metros	Diámetro medio exterior		Espesor mínimo de pared		Diámetro interior medio		Presión ruptura		Peso aprox p/tubo kg
mm	pulg		psi	Kg/cm ³		mm	plg	mm	plg	mm	plg	Kg/cm ³	psi	
12	1/2	13.5	315	22.1	6	21.34	0.840	1.57	0.062	18.20	0.716	70.2	1000	0.87
18	3/4	17	250	17.6	6	26.67	1.050	1.57	0.062	23.53	0.926	56.2	800	1.11
25	1	17	250	17.6	6	33.40	1.315	1.96	0.077	29.48	1.161	56.2	800	1.73
31	1 1/4	17	250	17.6	6	42.16	1.660	2.49	0.098	37.18	1.464	56.2	800	2.75
38	1 1/2	17	250	17.6	6	48.26	1.900	2.84	0.112	42.58	1.676	56.2	800	3.63
50	2	17	250	17.6	6	60.33	2.375	3.56	0.140	53.21	2.095	56.2	800	5.62
62	2 1/2	17	250	17.6	6	73.03	2.875	4.29	0.169	54.45	2.537	56.2	800	8.22
75	3	17	250	17.6	6	88.90	3.500	5.23	0.206	78.44	3.880	56.2	800	12.19
100	4	17	250	17.6	6	114.30	4.500	6.73	0.265	100.84	3.970	56.2	800	20.16
150	6	17	250	17.6	6	168.28	6.625	9.91	0.390	148.46	5.845	56.2	800	43.09
200	8	17	250	17.6	6	219.08	8.625	12.90	0.508	193.28	7.609	56.2	800	74.24
25	1	26	160	11.2	6	33.40	1.315	1.52	0.060	30.36	1.195	35.1	510	1.36
31	1 1/4	26	160	11.2	6	42.16	1.660	1.63	0.064	38.90	1.531	35.1	510	1.84
38	1 1/2	26	160	11.2	6	48.26	1.900	1.85	0.073	44.56	1.754	35.1	510	2.39
50	2	26	160	11.2	6	60.33	2.375	2.31	0.091	55.71	2.193	35.1	510	3.37
62	2 1/2	26	160	11.2	6	73.03	2.875	2.79	0.110	67.45	2.656	35.1	510	5.5
75	3	26	160	11.2	6	88.90	3.500	3.43	0.135	82.04	3.230	35.1	510	8.19
100	4	26	160	11.2	6	114.30	4.500	4.39	0.173	105.52	4.154	35.1	510	13.50
150	6	26	160	11.2	6	168.28	6.625	6.48	0.255	155.32	6.115	35.1	510	29.29
200	8	26	160	11.2	6	219.08	8.625	8.43	0.332	202.22	7.961	35.1	510	49.70
250	10	26	160	11.2	6	273.05	10.75	10.49	0.413	252.07	9.924	35.1	510	76.99
300	12	32.5	125	8.8	6	323.85	12.75	12.45	0.490	298.95	11.770	35.1	510	108.30
38	1 1/2	32.5	125	8.8	6	48.26	1.900	1.52	0.060	45.22	1.780	28.1	400	1.86
50	2	32.5	125	8.8	6	60.33	2.375	1.85	0.073	56.63	2.230	28.1	400	2.90
62	2 1/2	32.5	125	8.8	6	73.03	2.875	2.24	0.088	68.55	2.699	28.1	400	4.25
75	3	32.5	125	8.8	6	88.90	3.500	2.74	0.108	83.42	3.284	28.1	400	6.58
100	4	32.5	125	8.8	6	114.30	4.500	3.51	0.138	107.28	4.224	28.1	400	10.84
150	6	32.5	125	8.8	6	168.28	6.625	5.18	0.204	157.92	6.217	28.1	400	23.24
200	8	32.5	125	8.8	6	219.08	8.625	6.73	0.265	205.62	8.095	28.1	400	69.94
250	10	32.5	125	8.8	6	273.05	10.75	8.41	0.331	256.23	10.088	28.1	400	62.22
300	12	32.5	125	8.8	6	323.85	12.75	9.96	0.392	303.93	11.966	28.1	400	87.51
75	3	41	100	7	6	88.90	3.500	2.16	0.085	84.58	3.330	22.1	315	5.18
100	4	41	100	7	6	114.30	4.500	2.79	0.110	108.72	4.280	22.1	315	8.74
150	6	41	100	7	6	168.28	6.625	4.11	0.162	160.08	6.302	22.1	315	18.9
200	8	41	100	7	6	219.08	8.625	5.33	0.210	208.42	8.206	22.1	315	31.92
250	10	41	100	7	6	273.05	10.75	6.65	0.262	259.75	10.226	22.1	315	49.58
300	12	41	100	7	6	323.85	12.75	7.90	0.311	308.05	12.128	22.1	315	69.86

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Especificaciones para tubería de hierro galvanizado**

Diametro Nominal (")	BS-1387, LIVIANO				BS-1387, MEDIANO				ASTM A-53			
	CEDULA	20		Diametro Intero (")	CEDULA	30		Diametro Intero (")	CEDULA	40		Diametro Intero (")
	Espesor de Pared (")	Presion (PSI)	Peso (kilos)		Espesor de Pared (")	Presion (PSI)	Peso (kilos)		Espesor de Pared (")	Presion (PSI)	Peso (kilos)	
1/2	0.080	700.000	5.710	0.683	-	-	-	-	0.109	700.000	7.560	0.621
3/4	0.092	700.000	8.400	0.879	-	-	-	-	0.113	700.000	10.080	0.825
1	0.104	700.000	12.060	1.131	-	-	-	-	0.133	700.000	15.000	1.035
1 1/4	0.104	700.000	15.420	1.449	-	-	-	-	0.140	1000.000	20.280	1.381
1 1/2	0.116	700.000	19.560	1.673	-	-	-	-	0.145	1000.000	24.300	1.612
2	0.116	700.000	24.660	2.142	-	-	-	-	0.154	1000.000	32.580	2.066
2 1/2	0.128	700.000	34.800	2.744	0.144	700.000	39.120	2.712	0.203	1000.000	51.720	2.476
3	0.128	700.000	40.500	3.372	0.160	700.000	50.820	3.340	0.216	2220.000	67.680	3.284
4	0.144	700.000	56.700	4.356	0.176	700.000	72.600	4.288	0.237	1900.000	97.260	4.263
5	-	-	-	-	0.192	700.000	97.200	5.120	0.258	1670.000	130.560	5.047
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia.

Se realizan tres casos diferentes que corresponden a diseños de acueductos realizados en el Instituto de Fomento Municipal de Guatemala, INFOM.

4.1. Caso número 1

El siguiente caso es una propuesta de un diseño de acueducto para la aldea San Pedro Cutzan, Chicacao, Suchitepéquez.

La tasa de crecimiento del lugar es de 3,18 % y contaba con 366 habitantes para cuando se realizó la propuesta de diseño. El periodo de diseño considerado es de 20 años. Para determinar la población futura se utiliza la ecuación 29.

$$Pf = 366 * (1 + 0,0318)^{20} = 685$$

Dada la libreta topográfica que se comprende de la fuente hacia donde abastecerá. Entre la estación 0 y la estación 1, determinaron una distancia medida de 32 metros; sin embargo, a este valor se le incrementa un 3 % por razones de diseño, así que la longitud de diseño se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Longitud de diseño} = (32) * 1,03 = 32,96 \text{ m}$$

Para este tramo, se propuso una tubería de PVC con diámetro de 1", pero en el mercado, estos diámetros son comerciales, según la tabla IV usando una presión de 160 PSI el diámetro real es de 1,195", ya que se considera el diámetro interno que generalmente es un tanto mayor que el diámetro de catálogo.

Para determinar el caudal medio se emplea la ecuación 32, utilizando una dotación de 46 L/hab/día.

$$Q_{md} = \frac{46 * 685}{86\ 400} = 0,365 \text{ L/s}$$

Con este caudal, se calcula el caudal día máximo con la ecuación 33, usando un facto día máximo de 1,2.

$$Q_{max.diarario} = 0,365 * 1,2 = 0,44 \text{ L/s}$$

Teniendo estos datos, utilizando ecuación 27, para encontrar la pérdida del tramo, se tomará en cuenta de acuerdo a la tabla III, que el coeficiente de Hazen-Williams, Ch es igual a 150.

$$hf = \frac{1743,811 * L * Q^{1,85}}{D^{4,87} * C_h^{1,85}} = \frac{1743,811 * 32,96 * 0,44^{1,85}}{1,195^{4,87} * 150^{1,85}} = 0,50 \text{ m.}$$

Según la topografía dada, la línea piezométrica de la estación 0 se encuentra en la cota 499,00 m, por lo que la piezométrica de la estación 1 se obtiene restando la pérdida que existe.

$$\text{Piezométrica estación 1} = 499,00 - 0,50 = 498,50 \text{ m}$$

Para obtener la presión dinámica se resta el valor de la cota de la estación a su piezométrica.

$$\text{Presión dinámica en 1} = 498,50 - 495,28 = 3,22 \text{ m}$$

La presión estática es el resultado de restar la cota del terreno con la piezométrica de la estación 0, esta última, se hace con todas las estaciones.

$$\text{Presión estática en 1} = 499,00 - 495,28 = 3,72 \text{ m}$$

Ahora bien, el cálculo de la pérdida con la ecuación 24 que es la ecuación de Darcy-Weisbach es un tanto diferente, ya que para esta ecuación es necesario conocer la temperatura ambiente y con ello se obtiene la viscosidad. Durante el desarrollo del caso, se tomaron en cuenta diferentes temperaturas las cuales fueron: 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C y 40 °C. Para el ejemplo se tomará la temperatura 20 °C. Según la tabla I, la viscosidad cinemática del agua a esa temperatura toma un valor de 0,00000102 m²/s.

Otro dato que es necesario para utilizar la ecuación es conocer la rugosidad relativa, según la tabla II el valor para la tubería PVC es de 0,0015 mm.

Se calcula la velocidad en función del caudal y la tubería del tramo.

$$v = \frac{0,44/1000}{\frac{\pi}{4} * \left(\frac{2,54 * 1,195}{100}\right)^2} = 0,608 \text{ m/s}$$

Con este valor, se calcula el número de Reynolds (valor adimensional):

$$Re = \frac{0,608 * 1,195 * \frac{2,54}{100}}{0,00000102} = 18095,10$$

Utilizando la ecuación 25 y un método iterativo, se procede a determinar el valor f para la ecuación de Darcy-Weisbach.

Se propone un valor inicial f y se utiliza una parte de la ecuación 25 como se muestra de la siguiente manera.

Iteración 1:

$$f = 0,021$$

$$-2 \log \left(\frac{0,00015}{3,7 * 1,195 * 2,54} + \frac{2,51}{18095,10 * \sqrt{0,021}} \right) = 6,02595$$

Ahora se calcula la otra parte de la ecuación 25 utilizando el valor anterior de la siguiente manera.

$$\frac{1}{\sqrt{6,02595}} = 0,02753$$

El resultado con el primer valor f, si es igual o la diferencia en valor absoluto es menor a 0,0001 se toma para utilizarlo en la de Darcy-Weisbach de lo contrario se repite el procedimiento con la diferencia que ahora este es el nuevo valor f.

$$|0,021 - 0,02753| = 0,00653 > 0,0001$$

Iteración 2:

$$f = 0,02753$$

$$-2 \log \left(\frac{0,00015}{3,7 * 1,195 * 2,54} + \frac{2,51}{18095,10 * \sqrt{0,02753}} \right) = 6,14195$$

$$\frac{1}{\sqrt{6,14195}} = 0,02651$$

$$|0,02753 - 0,02651| = 0,0102 > 0,0001$$

Iteración 3:

$$f = 0,02651$$

$$-2 \log \left(\frac{0,00015}{3,7 * 1,195 * 2,54} + \frac{2,51}{18095,10 * \sqrt{0,02651}} \right) = 6,12565$$

$$\frac{1}{\sqrt{6,12565}} = 0,02665$$

$$|0,02651 - 0,02665| = 0,00014 > 0,0001$$

Debido a que el error sigue siendo mayor al permitido, se debe seguir iterando:

Iteración 4:

$$f = 0,02665$$

$$-2 \log \left(\frac{0,00015}{3,7 * 1,195 * 2,54} + \frac{2,51}{18095,10 * \sqrt{0,02665}} \right) = 6,1279$$

$$\frac{1}{\sqrt{6,1279}} = 0,02663$$

$$|0,02665 - 0,02663| = 0,00002 < 0,0001$$

De acuerdo con el dato obtenido, se deduce que el valor encontrado de f (fricción) es el adecuado para diseño, ya que el error está dentro del margen permitido, de tal forma que el valor f para la ecuación de Darcy-Weisbach es de 0,02663.

Entonces, la pérdida de carga se puede calcular de la siguiente forma:

$$hf = f \frac{L v^2}{d^5 2g} = 0,02663 * \frac{32,96}{\left(1,195 * \frac{2,54}{100}\right)^5} * \frac{0,608^2}{2 * 9,81} = 0,54 \text{ m}$$

$$\text{Piezométrica estación 1} = 499,00 - 0,54 = 498,46 \text{ m}$$

$$\text{Presión dinámica en 1} = 498,46 - 495,28 = 3,18 \text{ m}$$

De esta forma es que se calcularon los valores para las diferentes cotas y datos dados según la topografía y el proceso de cálculo descrito. A continuación se muestra una tabla en la cual se resumen los valores correspondientes al caso identificado con el número uno.

Tabla VI. Datos del caso 1

Est.	P.O.	Dist. Medida (m)	Dist. Acumulada (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
Línea de conducción												
0	1	32	32	495,28	32,96	1	1,195	PVC	160	150	0,44	0,61
1	2	12	44	493,85	12,36	1	1,195	PVC	160	150	0,44	0,61
2	3	84	128	487,02	86,52	1	1,195	PVC	160	150	0,44	0,61
3	4	35	163	485,85	36,05	1	1,195	PVC	160	150	0,44	0,61
4	5	18	181	482,74	18,54	0,75	0,926	PVC	250	150	0,44	1,01
5	6	56	237	472,34	57,68	0,75	0,926	PVC	250	150	0,44	1,01
7.1	6	150	150	476,34	154,5	1	1,161	PVC	250	150	0,38	0,56
7.2	6	150	150	477,34	154,5	1	1,161	PVC	250	150	0,38	0,56
6	8	51	107	467,36	52,53	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
8	9	52	159	461,31	53,56	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
9	10	54,2	213,2	458,69	55,826	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
10	11	20,6	233,8	457,84	21,218	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
11	12	44	277,8	456,25	45,32	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
12	13	12,8	290,6	457,28	13,184	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
13	14	20,8	311,4	455,67	21,424	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
14	15	34	345,4	453,60	35,02	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
15	16	38	383,4	452,28	39,14	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
16	17	31	414,4	458,00	31,93	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
17	18	54	468,4	462,16	55,62	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
18	19	39	507,4	459,04	40,17	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
19	20	116	623,4	454,85	119,48	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
20	21	76	699,4	451,74	78,28	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
21	22	25	724,4	455,31	25,75	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
22	23	21	745,4	456,00	21,63	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
23	24	84	829,4	451,23	86,52	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
24	25	104	933,4	437,15	107,12	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
25	26	40	973,4	431,68	41,2	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
26	26	64	1037,4	411,66	65,92	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
26	26	12	1049,4	411,66	12,36	1,5	1,676	HG	LIVIANO	100	1,14	0,80
26	27	97	1146,4	423,32	99,91	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
27	28	23	1169,4	424,51	23,69	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73

Continuación de la tabla VI.

Est.	P.O.	Dist. Medida (m)	Dist. Acumulada (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
28	29	80,8	1250,2	423,91	83,224	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
29	30	24	1274,2	423,28	24,72	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
30	30	62	1336,2	414,94	63,86	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
30	31	36,6	1372,8	421,74	37,698	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
31	32	68	1440,8	431,07	70,04	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
32	33	13,4	1454,2	430,65	13,802	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
33	34	37,8	1492	428,57	38,934	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
34	35	24,4	1516,4	426,78	25,132	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
35	36	30,8	1547,2	426,62	31,724	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
36	36	99	1646,2	403,10	101,97	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
36	36	12	1658,2	403,03	12,36	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
36	37	54,6	1712,8	403,03	56,238	1,5	1,676	HG	LIVIANO	100	1,14	0,80
37	38	9,4	1722,2	403,71	9,682	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
38	39	19,6	1741,8	401,67	20,188	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
39	39	18	1759,8	392,61	18,54	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
39	39	12	1771,8	392,61	12,36	1,5	1,676	HG	LIVIANO	100	1,14	0,80
39	40	78	1849,8	403,37	80,34	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
40	41	34,6	1884,4	398,35	35,638	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
41	42	21,6	1906	405,57	22,248	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
42	43	48	1954	405,43	49,44	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
43	43	19	1973	400,07	19,57	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
43	44	41	2014	405,74	42,23	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
44	45	35	2049	414,75	36,05	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
45	45	112	2161	390,71	115,36	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
45	46	18	2179	403,04	18,54	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
46	47	118	2297	425,88	121,54	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
47	48	78	2375	424,19	80,34	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
48	48	44	2419	419,73	45,32	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
48	49	12	2431	425,42	12,36	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
49	50	28,8	2459,8	429,47	29,664	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
50	51	70	2529,8	433,56	72,1	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
51	52	60	2589,8	433,91	61,8	1,5	1,754	PVC	160	150	1,14	0,73
Línea de distribución												
52	54	135,6	135,6	380,16	139,668	1,25	1,532	PVC	160	150	2,53	2,13
Est.	P.O.	Dist. Medida (m)	Dist. Acumulada (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
54	56	138	273,6	379,41	142,14	1,25	1,532	PVC	160	150	2,53	2,13
56	59	80	80	354,17	82,4	2	2,193	PVC	160	150	2,45	1,01
59	64	77	157	356,17	79,31	2	2,193	PVC	160	150	1,83	0,75
64	66	50	207	354,87	51,5	2	2,193	PVC	160	150	1,62	0,66
66	69	29,4	236,4	353,43	30,282	1,5	1,754	PVC	160	150	1,05	0,67
69	71	29,4	265,8	352,88	30,282	1,5	1,754	PVC	160	150	0,93	0,60
71	73	62,6	328,4	348,72	64,478	1,5	1,754	PVC	160	150	0,78	0,50
73	76	82	410,4	356,71	84,46	1,5	1,754	PVC	160	150	0,50	0,32
66	67	34	34	364,67	35,02	1	1,195	PVC	160	150	0,58	0,80
66	68	35	35	349,82	36,05	0,75	0,926	PVC	250	150	0,26	0,60
69	70	32	32	362,94	32,96	0,75	0,926	PVC	250	150	0,33	0,76
71	72	52	52	366,89	53,56	1	1,195	PVC	160	150	0,40	0,55
73	74	41,8	41,8	353,48	43,054	0,75	0,926	PVC	250	150	0,26	0,60

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se resumen los valores de pérdidas de carga por fricción, determinados a través del proceso de cálculo, para el caso número uno.

Tabla VII. Pérdidas del caso 1

Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
Línea de conducción									
0	1	0,498108	0,624671	0,602295	0,578817	0,561336	0,544978	0,514408	0,490530
1	2	0,186790	0,234251	0,225861	0,217056	0,210501	0,204367	0,192903	0,183949
2	3	1,307533	1,639760	1,581025	1,519394	1,473508	1,430568	1,350321	1,287642
3	4	0,544805	0,683234	0,658760	0,633081	0,613962	0,596070	0,562634	0,536518
4	5	0,970135	1,178886	1,138018	1,095095	1,063113	1,033166	0,977163	0,933396
5	6	3,018197	3,667646	3,540500	3,406963	3,307462	3,214293	3,040063	2,903898
7,1	6	2,048923	2,602597	2,508089	2,408985	2,335241	2,266263	2,137442	2,036898
7,2	6	2,048923	2,602597	2,508089	2,408985	2,335241	2,266263	2,137442	2,036898
6	8	0,714762	0,851029	0,822395	0,792260	0,769761	0,748658	0,709093	0,678071
Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
8	9	0,728777	0,867716	0,838521	0,807794	0,784854	0,763338	0,722997	0,691367
9	10	0,759610	0,904427	0,873997	0,841970	0,818060	0,795633	0,753585	0,720617
10	11	0,288708	0,343749	0,332183	0,320011	0,310923	0,302399	0,286418	0,273888
11	12	0,616657	0,734221	0,709517	0,683518	0,664108	0,645901	0,611767	0,585003
12	13	0,179391	0,213592	0,206405	0,198842	0,193195	0,187899	0,177968	0,170183
13	14	0,291511	0,347086	0,335408	0,323118	0,313942	0,305335	0,289199	0,276547
14	15	0,476508	0,567353	0,548264	0,528173	0,513174	0,499105	0,472729	0,452047
15	16	0,532568	0,634100	0,612765	0,590311	0,573547	0,557824	0,528344	0,505230
16	17	0,434463	0,517292	0,499887	0,481570	0,467894	0,455067	0,431017	0,412161
17	18	0,756807	0,901090	0,870771	0,838863	0,815041	0,792697	0,750804	0,717958
18	19	0,546583	0,650787	0,628890	0,605846	0,588641	0,572503	0,542248	0,518525
19	20	1,625733	1,935674	1,870546	1,802002	1,750829	1,702830	1,612839	1,542280
20	21	1,065135	1,268200	1,225530	1,180622	1,147095	1,115647	1,056688	1,010459
21	22	0,350373	0,417171	0,403135	0,388363	0,377334	0,366989	0,347595	0,332388
22	23	0,294314	0,350424	0,338633	0,326225	0,316960	0,308271	0,291980	0,279206
23	24	1,177255	1,401695	1,354533	1,304898	1,267842	1,233084	1,167918	1,116823
24	25	1,457554	1,735432	1,677041	1,615588	1,569709	1,526675	1,445994	1,382733
25	26	0,560598	0,667474	0,645016	0,621380	0,603734	0,587183	0,556151	0,531821
26	26	0,896956	1,067958	1,032025	0,994208	0,965975	0,939493	0,889842	0,850913
26	26	0,444376	0,308414	0,303214	0,298018	0,294336	0,291045	0,285321	0,281260
26	27	1,359449	1,618624	1,564164	1,506847	1,464055	1,423918	1,348667	1,289665
27	28	0,322344	0,383797	0,370884	0,357294	0,347147	0,337630	0,319787	0,305797
28	29	1,132407	1,348297	1,302932	1,255188	1,219543	1,186109	1,123426	1,074277
29	30	0,336359	0,400484	0,387010	0,372828	0,362240	0,352310	0,333691	0,319092
30	30	0,868926	1,034584	0,999775	0,963139	0,935788	0,910133	0,862035	0,824322
30	31	0,512947	0,610739	0,590190	0,568563	0,552417	0,537272	0,508879	0,486616
31	32	0,953016	1,134706	1,096527	1,056346	1,026348	0,998211	0,945457	0,904095
32	33	0,187800	0,223604	0,216080	0,208162	0,202251	0,196706	0,186311	0,178160
33	34	0,529765	0,630763	0,609540	0,587204	0,570529	0,554888	0,525563	0,502570
34	35	0,341965	0,407159	0,393460	0,379042	0,368278	0,358182	0,339252	0,324411
35	36	0,431660	0,513955	0,496662	0,478463	0,464875	0,452131	0,428237	0,409502
36	36	1,387479	1,651998	1,596414	1,537916	1,494242	1,453277	1,376475	1,316256
36	36	0,168179	0,200242	0,193505	0,186414	0,181120	0,176155	0,166845	0,159546
36	37	2,021912	1,403286	1,379623	1,355980	1,339229	1,324255	1,298210	1,279733
37	38	0,131740	0,156856	0,151579	0,146024	0,141878	0,137988	0,130696	0,124978

Continuación de la tabla VII.

Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
38	39	0,274693	0,327062	0,316058	0,304476	0,295830	0,287720	0,272514	0,260592
39	39	0,252269	0,300363	0,290257	0,279621	0,271680	0,264232	0,250268	0,239319
39	39	0,444376	0,308414	0,303214	0,298018	0,294336	0,291045	0,285321	0,281260
39	40	1,093165	1,301574	1,257781	1,211691	1,177282	1,145006	1,084495	1,037050
40	41	0,484917	0,577365	0,557939	0,537494	0,522230	0,507913	0,481071	0,460025
41	42	0,302723	0,360436	0,348309	0,335545	0,326016	0,317079	0,300322	0,287183
42	43	0,672717	0,800969	0,774019	0,745656	0,724481	0,704619	0,667382	0,638185
43	43	0,266284	0,317050	0,306383	0,295156	0,286774	0,278912	0,264172	0,252615
43	44	0,574612	0,684161	0,661141	0,636915	0,618828	0,601862	0,570055	0,545116
44	45	0,490523	0,584040	0,564389	0,543708	0,528267	0,513785	0,486633	0,465343
45	45	1,569673	1,868927	1,806044	1,739864	1,690456	1,644112	1,557224	1,489097
45	46	0,252269	0,300363	0,290257	0,279621	0,271680	0,264232	0,250268	0,239319
46	47	1,653763	1,969048	1,902797	1,833071	1,781016	1,732189	1,640647	1,568871
47	48	1,093165	1,301574	1,257781	1,211691	1,177282	1,145006	1,084495	1,037050
48	48	0,616657	0,734221	0,709517	0,683518	0,664108	0,645901	0,611767	0,585003
48	49	0,168179	0,200242	0,193505	0,186414	0,181120	0,176155	0,166845	0,159546
49	50	0,403630	0,480581	0,464411	0,447394	0,434689	0,422772	0,400429	0,382911
50	51	0,981046	1,168079	1,128778	1,087415	1,056535	1,027570	0,973265	0,930686
51	52	0,840896	1,001211	0,967524	0,932070	0,905601	0,880774	0,834227	0,797731
Línea de distribución									
52	54	16,009952	17,623965	17,092100	16,530740	16,110643	15,715906	14,974296	14,391832
54	56	16,293314	17,935894	17,394615	16,823319	16,395788	15,994063	15,239328	14,646555
56	59	1,551517	1,768544	1,712407	1,653184	1,608875	1,567241	1,488992	1,427469
59	64	0,870432	1,016979	0,983637	0,948501	0,922239	0,897582	0,851289	0,814932
64	66	0,451110	0,532881	0,515172	0,496520	0,482585	0,469506	0,444964	0,425699
66	69	0,352932	0,423610	0,409221	0,394083	0,382785	0,372191	0,352336	0,336774
69	71	0,281958	0,342513	0,330717	0,318315	0,309063	0,300390	0,284146	0,271423
71	73	0,433604	0,536388	0,517541	0,497741	0,482982	0,469157	0,443283	0,423037
73	76	0,249489	0,324501	0,312497	0,299916	0,290558	0,281808	0,265473	0,252727
66	67	0,882280	1,074289	1,037035	0,997893	0,968716	0,941385	0,890244	0,850240
66	68	0,712756	0,918124	0,884225	0,848713	0,822312	0,797637	0,751607	0,715730
69	70	1,012915	1,269357	1,223813	1,176042	1,140489	1,107230	1,045112	0,996631
71	72	0,678579	0,860177	0,829017	0,796338	0,772018	0,749268	0,706773	0,673600
73	74	0,851234	1,096502	1,056017	1,013606	0,982076	0,952606	0,897633	0,854786

Fuente: elaboración propia.

Conociendo los valores de las pérdidas de carga por fricción, se procede al cálculo de las cotas piezométricas de las líneas de conducción y/o distribución. Las cotas piezométricas son dispuestas en la siguiente tabla resumen.

Tabla VIII. Piezométrica del caso 1

Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
Línea de conducción									
		499,000000	499,000000	499,000000	499,000000	499,000000	499,000000	499,000000	499,000000
0	1	498,501892	498,375329	498,397705	498,421183	498,438664	498,455022	498,485592	498,509470
1	2	498,315102	498,141078	498,171844	498,204127	498,228162	498,250655	498,292689	498,325521
2	3	497,007569	496,501317	496,590820	496,684732	496,754654	496,820088	496,942368	497,037879
3	4	496,462764	495,818084	495,932059	496,051652	496,140692	496,224018	496,379734	496,501361
4	5	495,492629	494,639198	494,794042	494,956556	495,077580	495,190852	495,402571	495,567965
5	6	492,474432	490,971552	491,253542	491,549594	491,770118	491,976559	492,362508	492,664067
7.1	6	481,841077	481,287403	481,381911	481,481015	481,554759	481,623737	481,752558	481,853102
7.2	6	485,371077	484,817403	484,911911	485,011015	485,084759	485,153737	485,282558	485,383102
6	8	471,625238	471,488971	471,517605	471,547740	471,570239	471,591342	471,630907	471,661929
8	9	470,896461	470,621255	470,679084	470,739946	470,785385	470,828004	470,907910	470,970562
9	10	470,136852	469,716828	469,805088	469,897976	469,967325	470,032372	470,154325	470,249945
10	11	469,848144	469,373079	469,472904	469,577965	469,656402	469,729972	469,867907	469,976058
11	12	469,231487	468,638858	468,763387	468,894447	468,992294	469,084071	469,256140	469,391055
12	13	469,052095	468,425266	468,556982	468,695605	468,799099	468,896173	469,078172	469,220873
13	14	468,760585	468,078180	468,221574	468,372488	468,485157	468,590838	468,788973	468,944326
14	15	468,284077	467,510827	467,673310	467,844315	467,971983	468,091732	468,316244	468,492278
15	16	467,751509	466,876727	467,060545	467,254004	467,398436	467,533909	467,787900	467,987049
16	17	467,317046	466,359434	466,560658	466,772434	466,930542	467,078842	467,356883	467,574888
17	18	466,560239	465,458345	465,689886	465,933571	466,115501	466,286145	466,606079	466,856930
18	19	466,013657	464,807558	465,060996	465,327725	465,526860	465,713642	466,063831	466,338405
19	20	464,387924	462,871884	463,190450	463,525723	463,776031	464,010812	464,450992	464,796126
20	21	463,322788	461,603683	461,964919	462,345100	462,628936	462,895164	463,394304	463,785667
21	22	462,972415	461,186512	461,561785	461,956738	462,251602	462,528175	463,046709	463,453279
22	23	462,678101	460,836088	461,223151	461,630513	461,934642	462,219904	462,754730	463,174073
23	24	461,500846	459,434393	459,868618	460,325615	460,666800	460,986820	461,586812	462,057250
Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
24	25	460,043293	457,698961	458,191576	458,710027	459,097091	459,460145	460,140818	460,674517
25	26	459,482695	457,031488	457,546561	458,088647	458,493357	458,872962	459,584666	460,142696
26	26	458,585739	455,963529	456,514535	457,094438	457,527382	457,933470	458,694824	459,291783
26	26	458,141363	455,655115	456,211321	456,796421	457,233046	457,642425	458,409503	459,010523
26	27	456,781914	454,036491	454,647158	455,289574	455,768991	456,218506	457,060836	457,720859
27	28	456,459570	453,652693	454,276274	454,932280	455,421844	455,880876	456,741049	457,415062
28	29	455,327163	452,304396	452,973342	453,677092	454,202301	454,694767	455,617623	456,340784
29	30	454,990805	451,903912	452,586332	453,304264	453,840060	454,342457	455,283932	456,021692
30	30	454,121878	450,869328	451,586557	452,341125	452,904272	453,432324	454,421897	455,197370
30	31	453,608932	450,258589	450,996368	451,772562	452,351855	452,895052	453,913019	454,710754
31	32	452,655916	449,123884	449,899841	450,716216	451,325507	451,896841	452,967561	453,806660
32	33	452,468116	448,900280	449,683761	450,508054	451,123256	451,700134	452,781251	453,628500
33	34	451,938351	448,269517	449,074221	449,920849	450,552728	451,145247	452,255687	453,125929
34	35	451,596386	447,862358	448,680761	449,541807	450,184450	450,787065	451,916435	452,801519
35	36	451,164726	447,348403	448,184099	449,063345	449,719575	450,334934	451,488198	452,392017
36	36	449,777247	445,696405	446,587684	447,525429	448,225332	448,881657	450,111724	451,075761
36	36	449,609068	445,496163	446,394180	447,339015	448,044212	448,705502	449,944878	450,916215
36	37	447,587156	444,092877	445,014557	445,983034	446,704983	447,381247	448,646668	449,636482
37	38	447,455415	443,936021	444,862978	445,837010	446,563105	447,243259	448,515973	449,511504
38	39	447,180722	443,608959	444,546920	445,532534	446,267276	446,955539	448,243458	449,250912
39	39	446,928454	443,308596	444,256663	445,252913	445,995595	446,691307	447,993190	449,011593
39	39	446,484077	443,000181	443,953449	444,954895	445,701259	446,400262	447,707869	448,730333
39	40	445,390912	441,698607	442,695668	443,743204	444,523977	445,255256	446,623374	447,693283
40	41	444,905995	441,121242	442,137730	443,205710	444,001747	444,747342	446,142303	447,233258
41	42	444,603272	440,760807	441,789421	442,870165	443,675731	444,430264	445,841981	446,946075
42	43	443,930555	439,959838	441,015402	442,124509	442,951250	443,725644	445,174599	446,307891
43	43	443,664272	439,642788	440,709019	441,829353	442,664476	443,446732	444,910428	446,055276
43	44	443,089659	438,958627	440,047878	441,192438	442,045649	442,844870	444,340372	445,510160
44	45	442,599136	438,374588	439,483489	440,648731	441,517381	442,331085	443,853740	445,044817
45	45	441,029463	436,505661	437,677445	438,908866	439,826926	440,686973	442,296516	443,555719

Continuación de la tabla VIII.

45	46	440,777194	436,205298	437,387188	438,629245	439,555245	440,422741	442,046248	443,316400
46	47	439,123431	434,236250	435,484391	436,796174	437,774229	438,690552	440,405601	441,747530
47	48	438,030266	432,934676	434,226610	435,584483	436,596948	437,545545	439,321105	440,710480
48	48	437,413609	432,200455	433,517092	434,900964	435,932840	436,899644	438,709339	440,125477
48	49	437,245430	432,000212	433,323587	434,714550	435,751720	436,723489	438,542493	439,965931
Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
49	50	436,841799	431,519631	432,859176	434,267157	435,317031	436,300718	438,142064	439,583020
50	51	435,860754	430,351552	431,730398	433,179741	434,260497	435,273148	437,168799	438,652334
51	52	435,019857	429,350341	430,762874	432,247671	433,354895	434,392373	436,334572	437,854603
Línea de distribución									
52	53	433,910000	433,910000	433,910000	433,910000	433,910000	433,910000	433,910000	433,910000
52	54	417,900048	416,286035	416,817900	417,379260	417,799357	418,194094	418,935704	419,518168
54	56	401,606734	398,350141	399,423285	400,555941	401,403569	402,200031	403,696377	404,871612
56	59	376,858483	376,641456	376,697593	376,756816	376,801125	376,842759	376,921008	376,982531
59	64	375,988051	375,624476	375,713957	375,808315	375,878886	375,945177	376,069719	376,167599
64	66	375,536941	375,091595	375,198785	375,311795	375,396301	375,475671	375,624755	375,741900
66	69	375,184009	374,667986	374,789564	374,917712	375,013516	375,103480	375,272418	375,405125
69	71	374,902051	374,325473	374,458847	374,599397	374,704453	374,803089	374,988272	375,133702
71	73	374,468448	373,789085	373,941306	374,101656	374,221471	374,333932	374,544989	374,710666
73	76	374,218959	373,464584	373,628809	373,801740	373,930913	374,052124	374,279516	374,457939
66	67	374,654661	374,017306	374,161750	374,313902	374,427585	374,534286	374,734511	374,891659
66	68	374,824185	374,173472	374,314560	374,463082	374,573989	374,678034	374,873148	375,026170
69	70	374,171095	373,398629	373,565751	373,741670	373,873027	373,996249	374,227306	374,408494
71	72	374,223473	373,465296	373,629829	373,803059	373,932435	374,053821	374,281499	374,460103
73	74	373,617214	372,692583	372,885289	373,088051	373,239395	373,381326	373,647356	373,855880

Fuente: elaboración propia.

Una vez se han calculado las cotas piezométricas, de acuerdo con el procedimiento establecido en los capítulos anteriores, se procede al cálculo de las presiones dinámicas y estáticas de las líneas de conducción y distribución, que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla IX. Dinámicas y estática del caso 1

Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
Línea de conducción										
0	1	3,219795	3,093232	3,115608	3,139086	3,156566	3,175022	3,203495	3,227372	3,171903
1	2	4,464620	4,290596	4,321363	4,353645	4,377681	4,400173	4,442207	4,475039	5,149518
2	3	9,985902	9,479650	9,569153	9,663065	9,732987	9,798420	9,920701	10,016212	11,978333
3	4	10,612711	9,968031	10,082007	10,201599	10,290640	10,373965	10,529682	10,651309	13,149947
4	5	12,750861	11,897430	12,052273	12,214788	12,335812	12,449084	12,660803	12,826197	16,258232
5	6	20,131160	18,628280	18,910270	19,206322	19,426846	19,633286	20,019236	20,320795	26,656728
7.1	6	5,497805	4,944131	5,038639	5,137742	5,211487	5,280465	5,409286	5,509830	22,656728
7.2	6	8,027805	7,474131	7,568639	7,667742	7,741487	7,810465	7,939286	8,039830	21,656728
6	8	4,261464	4,125197	4,153831	4,183966	4,206465	4,227568	4,267133	4,298155	31,636226
8	9	9,584795	9,309588	9,367417	9,428279	9,473718	9,516338	9,596243	9,658895	37,688333
9	10	11,450467	11,030443	11,118703	11,211591	11,280940	11,345987	11,467940	11,563561	40,313615
10	11	12,005343	11,530278	11,630103	11,735164	11,813600	11,887171	12,025106	12,133256	41,157199
11	12	12,984363	12,391734	12,516264	12,647324	12,745171	12,836948	13,009017	13,143932	42,752877
12	13	11,768630	11,141801	11,273517	11,412140	11,515634	11,612708	11,794707	11,937408	41,716535
13	14	13,090706	12,408300	12,551694	12,702609	12,815278	12,920959	13,119094	13,274447	43,330121
14	15	14,687181	13,913932	14,076415	14,247419	14,375088	14,494837	14,719349	14,895383	45,403105
15	16	15,474684	14,599902	14,783720	14,977179	15,121611	15,257084	15,511075	15,710224	46,723175
16	17	9,316022	8,358410	8,559634	8,771410	8,929518	9,077818	9,355859	9,573864	40,998976
17	18	4,397089	3,295194	3,526736	3,770420	3,952350	4,122995	4,442928	4,693780	36,836849
18	19	6,976414	5,770315	6,023753	6,290482	6,489617	6,676399	7,026588	7,301163	39,962757
19	20	9,542540	8,026500	8,345066	8,680339	8,930647	9,165428	9,605608	9,950742	44,154616
20	21	11,579551	9,860446	10,221682	10,601864	10,885699	11,151927	11,651067	12,042430	47,256763
21	22	7,663859	5,877956	6,253228	6,648182	6,943046	7,219619	7,738153	8,144723	43,691444
22	23	6,673580	4,831567	5,218630	5,625992	5,930120	6,215383	6,750208	7,169552	42,995478
23	24	10,268200	8,201747	8,635972	9,092969	9,434154	9,754174	10,354166	10,824604	47,767354
24	25	22,896963	20,552632	21,045247	21,563697	21,950761	22,313815	22,994488	23,528187	61,853670
25	26	27,800533	25,349325	25,864398	26,406484	26,811194	27,190800	27,902504	28,460534	67,317837
26	26	46,927747	44,305538	44,856544	45,436447	45,869391	46,275478	47,036832	47,633792	87,342008
26	26	46,481363	43,995115	44,551321	45,136421	45,573046	45,982425	46,749503	47,350523	87,340000
26	27	33,461326	30,715904	31,326570	31,968986	32,448403	32,897919	33,740249	34,400271	75,679413
27	28	31,951615	29,144738	29,768319	30,424325	30,913889	31,372921	32,233094	32,907107	74,492045
28	29	31,421944	28,399177	29,068122	29,771873	30,297081	30,789548	31,712404	32,435565	75,094781
29	30	31,712686	28,625793	29,308213	30,026146	30,561942	31,064339	32,005813	32,743573	75,721881
Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
30	30	39,182134	35,929584	36,646814	37,401381	37,964528	38,492580	39,482153	40,257626	84,060256
30	31	31,870656	28,520314	29,258092	30,034287	30,613580	31,156776	32,174743	32,972479	77,261724
31	32	21,590702	18,058670	18,834628	19,651003	20,260294	20,831627	21,902348	22,741446	67,934787
32	33	21,817644	18,249808	19,033289	19,857582	20,472785	21,049663	22,130779	22,978028	68,349528
33	34	23,371307	19,702473	20,507177	21,353805	21,985684	22,578203	23,688643	24,558885	70,432956
34	35	24,812371	21,078343	21,896746	22,757792	23,400435	24,003050	25,132420	26,017504	72,215985
35	36	24,541093	20,724770	21,560465	22,439711	23,095941	23,711301	24,864565	25,768384	72,376367
36	36	46,679208	42,598366	43,489645	44,427390	45,127293	45,783618	47,013685	47,977722	95,901961
36	36	46,575202	42,462298	43,360314	44,305149	45,010347	45,671636	46,911012	47,882349	95,966134
36	37	44,553290	41,059012	41,980691	42,949169	43,671117	44,347381	45,612802	46,602617	95,966134
37	38	43,741955	40,222561	41,149518	42,123550	42,849645	43,529799	44,802512	45,798044	95,286540
38	39	45,510636	41,938873	42,876834	43,862448	44,597189	45,285453	46,573372	47,580826	97,329914
39	39	54,319160	50,699302	51,647370	52,643619	53,386302	54,082014	55,383897	56,402300	106,390707
39	39	53,874784	50,390888	51,344156	52,345602	53,091966	53,790969	55,098576	56,121040	106,390707
39	40	42,024048	38,331743	39,328804	40,376340	41,157113	41,888392	43,256510	44,326419	95,633136
40	41	46,559287	42,774535	43,791022	44,859002	45,655039	46,400635	47,795595	48,886551	100,653292
41	42	39,029625	35,187159	36,215773	37,296517	38,102083	38,856616	40,268333	41,372428	93,426352
42	43	38,501905	34,531188	35,586752	36,695858	37,522600	38,296994	39,745949	40,879240	93,571350
43	43	43,598671	39,577188	40,643419	41,763753	42,598876	43,381132	44,844827	45,989676	98,934400
43	44	37,354126	33,223094	34,312345	35,456905	36,310115	37,109337	38,604839	39,774626	93,264467
44	45	27,852902	23,628353	24,737255	25,902496	26,771147	27,584851	29,107505	30,298583	84,253766
45	45	50,324453	45,800651	46,972435	48,203856	49,121916	49,981963	51,591506	52,850710	108,294990
45	46	37,734025	33,162128	34,344018	35,586076	36,512076	37,379572	39,003078	40,273231	95,956831
46	47	13,245003	8,357821	9,605962	10,917745	11,895801	12,812123	14,527172	15,869101	73,121571
47	48	13,837895	8,742305	10,034239	11,392112	12,404577	13,353175	15,128735	16,518109	74,807629
48	48	17,687742	12,474588	13,791226	15,175098	16,206974	17,173778	18,983472	20,399611	79,274133
48	49	11,827765	6,582547	7,905922	9,296685	10,334055	11,305824	13,124828	14,548266	73,582335

Continuación de la tabla IX.

49	50	7,376270	2,054102	3,393647	4,801627	5,851502	6,835188	8,676535	10,117491	69,534471
50	51	2,301274	-3,207927	-1,829081	-0,379738	0,701017	1,713668	3,609320	5,092855	65,440521
51	52	1,106041	-4,563475	-3,150941	-1,666145	-0,558920	0,478558	2,420756	3,940788	65,086184
Línea de distribución										
52	54	37,740048	36,126035	36,657900	37,219260	37,639357	38,034094	38,775704	39,358168	53,750000
54	56	22,196734	18,940141	20,013285	21,145941	21,993569	22,790031	24,286377	25,461612	54,500000
56	59	22,688483	22,471456	22,527593	22,586816	22,631125	22,672759	22,751008	22,812531	24,240000
59	64	19,818051	19,454476	19,543957	19,638315	19,708886	19,775177	19,899719	19,997599	22,240000
Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
64	66	20,666941	20,221595	20,328785	20,441795	20,526301	20,605671	20,754755	20,871900	23,540000
66	69	21,754009	21,237986	21,359564	21,487712	21,583516	21,673480	21,842418	21,975125	24,980000
69	71	22,022051	21,445473	21,578847	21,719397	21,824453	21,923089	22,108272	22,253702	25,530000
71	73	25,748448	25,069085	25,221306	25,381656	25,501471	25,613932	25,824989	25,990666	29,690000
73	76	17,508959	16,754584	16,918809	17,091740	17,220913	17,342124	17,569516	17,747939	21,700000
66	67	9,984661	9,347306	9,491750	9,643902	9,757585	9,864286	10,064511	10,221659	13,740000
66	68	25,004185	24,353472	24,494560	24,643082	24,753989	24,858034	25,053148	25,206170	28,590000
69	70	11,231095	10,458629	10,625751	10,801670	10,933027	11,056249	11,287306	11,468494	15,470000
71	72	7,333473	6,575296	6,739829	6,913059	7,042435	7,163821	7,391499	7,570103	11,520000
73	74	20,137214	19,212583	19,405289	19,608051	19,759395	19,901326	20,167356	20,375880	24,930000

Fuente: elaboración propia.

4.2. Caso número 2

El siguiente caso es una propuesta de un diseño de acueducto para la aldea Sombrerito Alto, Nuevo Progreso, San Marcos.

La tasa de crecimiento del lugar es de 2,42 % y contaba con 528 habitantes cuando se realizó la propuesta de diseño. El periodo de diseño es de 22 años. Para determinar la población futura se utilizó la ecuación 29.

$$Pf = 528 * (1 + 0,0242)^{22} = 894 \text{ habitantes}$$

Dada la libreta topográfica que se comprende de la fuente hacia donde abastecerá. Entre la estación 0 y la estación 1, determinaron una distancia medida de 27,76 metros; sin embargo, a este valor se le incrementa un 3 % por razones de diseño, así que la longitud de diseño se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Longitud de diseño} = (27,76) * 1,03 = 28,59 \text{ m}$$

Para este tramo, se propuso una tubería de HG con diámetro de 2", pero en el mercado, estos diámetros son comerciales, según la tabla V con una presión de 700 PSI el diámetro es de 2,142".

Para determinar el caudal medio se emplea la ecuación 32, utilizando una dotación de 70 l/hab/día.

$$Q_{md} = \frac{70 * 894}{86\ 400} = 0,724 \text{ L/s}$$

Con este caudal se obtiene el caudal día máximo con la ecuación 33, usando un factor día máximo de 1,5.

$$Q_{max.diario} = 0,724 * 1,5 = 1,09 \text{ L/s}$$

Teniendo estos datos, utilizando ecuación 27, para encontrar la pérdida del tramo, se tomará en cuenta de acuerdo a la tabla III que el coeficiente de Hazen-Williams, Ch es igual a 100.

$$hf = \frac{1743,811 * L * Q^{1,85}}{D^{4,87} * C_h^{1,85}} = \frac{1743,811 * 28,59 * 1,09^{1,85}}{2,142^{4,87} * 100^{1,85}} = 0,29 \text{ m.}$$

Según la topografía dada, la línea piezométrica de la estación 0 se encuentra en 499,00 por lo que la piezométrica de la estación 1 se obtiene restando la pérdida que existe.

$$\text{Piezométrica estación 1} = 1\ 000 - 0,29 = 999,71 \text{ m}$$

Para obtener la presión dinámica se resta el valor de la cota de la estación a la piezométrica de la misma.

$$\textit{Presión dinámica en 1} = 999,71 - 996,38 = 3,33 \textit{ m}$$

La presión estática es el resultado de restar la cota del terreno con la piezométrica de la estación 0, esta última, se hace con todas las estaciones.

$$\textit{Presión estática en 1} = 1\ 000 - 996,38 = 3,62 \textit{ m}$$

Ahora bien, el cálculo de la pérdida con la ecuación 24 que es la ecuación de Darcy-Weisbach es un tanto diferente, ya que para esta ecuación es necesario saber la temperatura ambiente y con ello se obtiene la viscosidad. Durante el desarrollo del caso, se tomaron en cuenta diferentes temperaturas las cuales fueron: 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C y 40 °C. Para el ejemplo se tomará la temperatura 20 °C. Según la tabla I, la viscosidad cinemática del agua a esa temperatura toma un valor de 0,00000102 m²/s.

Otro dato que es necesario para utilizar la ecuación es conocer la rugosidad relativa, según la tabla II el valor para la tubería HG es de 0,15 mm.

Se calcula la velocidad en función del caudal y la tubería del tramo.

$$v = \frac{1,09/1\ 000}{\frac{\pi}{4} * \left(\frac{2,54 * 2,142}{100}\right)^2} = 0,469 \textit{ m/s}$$

Con este valor, se calcula el número de Reynolds (valor adimensional)

$$Re = \frac{0,0469 * 2,142 * \frac{2,54}{100}}{0,00000102} = 25011,75$$

Utilizando la ecuación 25 y un método iterativo, se procede a determinar el valor f para la ecuación de Darcy-Weisbach.

Se propone un valor inicial f y se utiliza una parte de la ecuación 25 como se muestra de la siguiente manera.

Iteración 1:

$$f = 0,021$$

$$-2 \log \left(\frac{0,015}{3,7 * 2,142 * 2,54} + \frac{2,51}{25011,75 * \sqrt{0,021}} \right) = 5,68464$$

Ahora se calcula la otra parte de la ecuación 25 utilizando el valor anterior de la siguiente manera.

$$\frac{1}{\sqrt{5,68464}} = 0,0309$$

El resultado con el primer valor f, si es igual o la diferencia en valor absoluto es menor a 0,0001 se toma para utilizarlo en la de Darcy-Weisbach de lo contrario se repite el procedimiento con la diferencia que ahora este es el nuevo valor f.

$$|0,021 - 0,0309| = 0,0099 > 0,0001$$

Iteración 2:

$$f = 0,0309$$

$$-2 \log \left(\frac{0,015}{3,7 * 2,142 * 2,54} + \frac{2,51}{25011,75 * \sqrt{0,0309}} \right) = 5,76168$$

$$\frac{1}{\sqrt{5,76168}} = 0,0301$$

$$|0,0309 - 0,0301| = 0,0008 > 0,0001$$

Iteración 3:

$$f = 0,0301$$

$$-2 \log \left(\frac{0,015}{3,7 * 2,142 * 2,54} + \frac{2,51}{25011,75 * \sqrt{0,0301}} \right) = 5,75659$$

$$\frac{1}{\sqrt{5,75659}} = 0,0302$$

$$|0,0301 - 0,0302| = 0,0001 = 0,0001$$

Iteración 4:

$$f = 0,0302$$

$$-2 \log \left(\frac{0,015}{3,7 * 2,142 * 2,54} + \frac{2,51}{25011,75 * \sqrt{0,0301}} \right) = 5,75693$$

$$\frac{1}{\sqrt{5,75693}} = 0,0302$$

$$|0,0302 - 0,0302| = 0,0000 < 0,0001$$

f para la ecuación de Darcy-Weisbach es de 0,0302

Por lo que la pérdida se calcula de la siguiente manera:

$$hf = f \frac{L v^2}{d^5 2g} = 0,0302 * \frac{28,59}{\left(2,142 * \frac{2,54}{100}\right)^5} * \frac{0,447^2}{2 * 9,81} = 0,18 m$$

$$\text{Piezométrica estación 1} = 1\ 000 - 0,18 = 999,82 m$$

$$\text{Presión dinámica en 1} = 999,82 - 996,38 = 3,44 m$$

De esta forma es que se calcularon los valores para las diferentes cotas y datos dados según la topografía y el proceso de cálculo descrito. A continuación, se muestra una tabla en la cual se resumen los valores correspondientes al caso identificado con el número dos.

Tabla X. Datos del caso 2

Est.	P.O.	Dist. Medida (m)	Dist. Acumulada (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
línea de conducción												
1	3	27,76	27,76	996,38	28,5928	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
3	4	40,15	67,91	997,85	41,3545	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
4	13	260,63	328,54	995,39	268,4489	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
13	16	70,36	398,9	978,01	72,4708	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
16	21	171,8	570,7	987,63	176,954	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
21	29	211,84	782,54	974,02	218,1952	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
29	30	17	799,54	974,03	17,51	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
30	35	121,01	920,55	973,15	124,6403	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
35	36	5,78	926,33	972,04	5,9534	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
36	53	369,88	1296,21	981,33	380,9764	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
53	58	122,71	1418,92	961,23	126,3913	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
58	65	146,81	1565,73	963,17	151,2143	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
65	66	22,91	1588,64	967,11	23,5973	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
66	68	39,78	1628,42	974,31	40,9734	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
68	72	86,94	1715,36	968,84	89,5482	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
72	81	192,26	1907,62	966,71	198,0278	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
81	100	379,53	2287,15	912,33	390,9159	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
100	121	473,62	2760,77	932,08	487,8286	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
121	122	20,2	2780,97	932,22	20,806	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
122	128	415,16	3196,13	932,22	427,6148	2	2,193	PVC	160	150	2,09	0,86
128	165	870,18	4066,31	936,79	896,2854	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45

Continuación de la tabla X.

165	166	16,77	4083,08	936,2	17,2731	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
166	177	204,81	4287,89	926,27	210,9543	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
177	182	93,38	4381,27	949,6	96,1814	2	2,1417	HG	TL	100	1,09	0,47
182	202	380,46	4761,73	956,5	391,8738	2	2,193	PVC	160	150	1,09	0,45
202	235	554,89	5316,62	915,81	571,5367	1,5	1,754	PVC	160	150	1,09	0,70
235	238	69,82	5386,44	936,33	71,9146	0,75	0,926	PVC	250	150	1,09	2,51

Fuente: elaboración propia.

En la siguiente tabla se resumen los valores de pérdidas de carga por fricción, determinados a través del proceso de cálculo, para el caso número dos.

Tabla XI. Pérdidas del caso 2

Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
Línea de conducción									
1	3	0,28589	0,19200	0,18781	0,18357	0,18053	0,17778	0,17294	0,16943
3	4	0,17403	0,21366	0,20624	0,19844	0,19262	0,18716	0,17694	0,16894
4	13	1,12973	1,38698	1,33879	1,28813	1,25035	1,21494	1,14861	1,09665
13	16	0,30498	0,37443	0,36142	0,34775	0,33755	0,32799	0,31008	0,29605
16	21	0,74468	0,91426	0,88249	0,84910	0,82420	0,80085	0,75713	0,72288
21	29	0,91824	1,12733	1,08817	1,04700	1,01629	0,98750	0,93359	0,89136
29	30	0,17508	0,11758	0,11501	0,11241	0,11055	0,10887	0,10590	0,10376
30	35	0,52453	0,64397	0,62160	0,59808	0,58054	0,56409	0,53330	0,50917
35	36	0,05953	0,03442	0,03323	0,03197	0,03104	0,03016	0,02852	0,02723
36	53	1,60328	1,96552	1,89693	1,82478	1,77094	1,72046	1,62581	1,55157
53	58	0,53190	0,65302	0,63033	0,60648	0,58869	0,57202	0,54079	0,51633
58	65	0,63636	0,78127	0,75413	0,72559	0,70431	0,68436	0,64700	0,61773
65	66	0,23594	0,15845	0,15499	0,15150	0,14899	0,14672	0,14272	0,13983
66	68	0,17243	0,21169	0,20434	0,19661	0,19084	0,18544	0,17531	0,16738
68	72	0,89537	0,60131	0,58818	0,57490	0,56538	0,55679	0,54161	0,53064
72	81	0,83337	1,02314	0,98759	0,95022	0,92235	0,89623	0,84730	0,80897
81	100	1,64511	2,01972	1,94955	1,87578	1,82077	1,76920	1,67261	1,59695
100	121	2,05295	2,52043	2,43287	2,34081	2,27215	2,20780	2,08727	1,99285
121	122	0,20803	0,13971	0,13666	0,13358	0,13136	0,12937	0,12584	0,12329
122	128	6,00061	6,93061	6,70671	6,47064	6,29411	6,12830	5,81685	5,57211
128	165	3,77188	4,63077	4,46990	4,30077	4,17462	4,05639	3,83493	3,66146
165	166	0,17271	0,11599	0,11346	0,11089	0,10906	0,10740	0,10447	0,10236
166	177	0,88777	1,08992	1,05206	1,01225	0,98256	0,95473	0,90261	0,86178
177	182	0,96169	0,55606	0,53679	0,51654	0,50143	0,48727	0,46074	0,43996
182	202	1,64914	2,02467	1,95433	1,88038	1,82523	1,77353	1,67671	1,60086
202	235	7,13821	8,53677	8,24803	7,94421	7,71742	7,50474	7,10606	6,79354
235	238	20,15538	22,59179	21,89033	21,15149	20,59966	20,08204	19,11210	18,35287

Fuente: elaboración propia.

Las cotas piezométricas son dispuestas en la siguiente tabla resumen.

Tabla XII. **Piezométricas del caso 2**

Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
Línea de conducción									
		1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
1	3	999,71411	999,80800	999,81219	999,81643	999,81947	999,82222	999,82706	999,83057
3	4	999,54008	999,59434	999,60595	999,61800	999,62686	999,63506	999,65012	999,66163
4	13	998,41035	998,20736	998,26716	998,32986	998,37650	998,42012	998,50151	998,56497
13	16	998,10537	997,83293	997,90574	997,98211	998,03896	998,09213	998,19143	998,26892
16	21	997,36068	996,91868	997,02325	997,13301	997,21476	997,29128	997,43430	997,54604
21	29	996,44244	995,79134	995,93508	996,08602	996,19847	996,30377	996,50071	996,65468
29	30	996,26737	995,67377	995,82007	995,97360	996,08792	996,19490	996,39481	996,55092
30	35	995,74284	995,02980	995,19847	995,37552	995,50739	995,63081	995,86151	996,04174
35	36	995,68331	994,99538	995,16524	995,34355	995,47635	995,60065	995,83299	996,01451
36	53	994,08003	993,02986	993,26831	993,51877	993,70541	993,88019	994,20718	994,46294
53	58	993,54813	992,37684	992,63798	992,91229	993,11671	993,30817	993,66639	993,94661
58	65	992,91177	991,59557	991,88386	992,18670	992,41240	992,62381	993,01939	993,32888
65	66	992,67583	991,43712	991,72886	992,03520	992,26342	992,47709	992,87667	993,18904
66	68	992,50340	991,22542	991,52452	991,83859	992,07258	992,29165	992,70136	993,02166
68	72	991,60803	990,62411	990,93634	991,26369	991,50719	991,73487	992,15975	992,49102
72	81	990,77466	989,60098	989,94875	990,31347	990,58484	990,83864	991,31245	991,68205
81	100	989,12956	987,58126	987,99920	988,43768	988,76408	989,06944	989,63984	990,08510
100	121	987,07661	985,06083	985,56633	986,09687	986,49192	986,86164	987,55258	988,09225
121	122	986,86857	984,92112	985,42967	985,96329	986,36056	986,73227	987,42674	987,96896
122	128	980,86796	977,99051	978,72296	979,49265	980,06645	980,60397	981,60988	982,39684
128	165	977,09608	973,35974	974,25307	975,19188	975,89183	976,54758	977,77495	978,73539
165	166	976,92337	973,24375	974,13961	975,08099	975,78277	976,44018	977,67048	978,63303
166	177	976,03561	972,15383	973,08755	974,06874	974,80021	975,48545	976,76787	977,77125
177	182	975,07392	971,59777	972,55076	973,55220	974,29878	974,99818	976,30713	977,33129
182	202	973,42478	969,57310	970,59643	971,67182	972,47355	973,22465	974,63042	975,73043
202	235	966,28657	961,03633	962,34840	963,72761	964,75613	965,71991	967,52436	968,93689
235	238	946,13119	938,44454	940,45807	942,57611	944,15646	945,63787	948,41226	950,58402

Fuente: elaboración propia.

Una vez se han calculado las cotas piezométricas, de acuerdo con el procedimiento establecido en los capítulos anteriores, se procede al cálculo de las presiones dinámicas y estáticas de las líneas de conducción y distribución, que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla XIII. Dinámicas y estática del caso 2

Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
Línea de conducción										
1	3	3,33411	3,42800	3,43219	3,43643	3,43947	3,44222	3,44706	3,45057	3,62
3	4	1,69008	1,74434	1,75595	1,76800	1,77686	1,78506	1,80012	1,81163	2,15
4	13	3,02035	2,81736	2,87716	2,93986	2,98650	3,03012	3,11151	3,17497	4,61
13	16	20,09537	19,82293	19,89574	19,97211	20,02896	20,08213	20,18143	20,25892	21,99
16	21	9,73068	9,28868	9,39325	9,50301	9,58476	9,66128	9,80430	9,91604	12,37
21	29	22,42244	21,77134	21,91508	22,06602	22,17847	22,28377	22,48071	22,63468	25,98
29	30	22,23737	21,64377	21,79007	21,94360	22,05792	22,16490	22,36481	22,52092	25,97
30	35	22,59284	21,87980	22,04847	22,22552	22,35739	22,48081	22,71151	22,89174	26,85
35	36	23,64331	22,95538	23,12524	23,30355	23,43635	23,56065	23,79299	23,97451	27,96
36	53	12,75003	11,69986	11,93831	12,18877	12,37541	12,55019	12,87718	13,13294	18,67
53	58	32,31813	31,14684	31,40798	31,68229	31,88671	32,07817	32,43639	32,71661	38,77
58	65	29,74177	28,42557	28,71386	29,01670	29,24240	29,45381	29,84939	30,15888	36,83
65	66	25,56583	24,32712	24,61886	24,92520	25,15342	25,36709	25,76667	26,07904	32,89
66	68	18,19340	16,91542	17,21452	17,52859	17,76258	17,98165	18,39136	18,71166	25,69
68	72	22,76803	21,78411	22,09634	22,42369	22,66719	22,89487	23,31975	23,65102	31,16
72	81	24,06466	22,89098	23,23875	23,60347	23,87484	24,12864	24,60245	24,97205	33,29
81	100	76,79956	75,25126	75,66920	76,10768	76,43408	76,73944	77,30984	77,75510	87,67
100	121	54,99661	52,98083	53,48633	54,01687	54,41192	54,78164	55,47258	56,01225	67,92
121	122	54,64857	52,70112	53,20967	53,74329	54,14056	54,51227	55,20674	55,74896	67,78
122	128	48,64796	45,77051	46,50296	47,27265	47,84645	48,38397	49,38988	50,17684	67,78
128	165	40,30608	36,56974	37,46307	38,40188	39,10183	39,75758	40,98495	41,94539	63,21
165	166	40,72337	37,04375	37,93961	38,88099	39,58277	40,24018	41,47048	42,43303	63,8
166	177	49,76561	45,88383	46,81755	47,79874	48,53021	49,21545	50,49787	51,50125	73,73
177	182	25,47392	21,99777	22,95076	23,95220	24,69878	25,39818	26,70713	27,73129	50,4
182	202	16,92478	13,07310	14,09643	15,17182	15,97355	16,72465	18,13042	19,23043	43,5
202	235	50,47657	45,22633	46,53840	47,91761	48,94613	49,90991	51,71436	53,12689	84,19
235	238	9,80119	2,11454	4,12807	6,24611	7,82646	9,30787	12,08226	14,25402	63,67

Fuente: elaboración propia.

4.3. Caso número 3

El siguiente caso es una propuesta de un diseño de acueducto para caserío El Rosario, aldea Los Encuentros, Sololá, Sololá.

La tasa de crecimiento del lugar es de 3,14 % y contaba con 690 habitantes cuando se realizó la propuesta de diseño. El periodo de diseño es de 22 años. Para determinar la población futura se utilizó la ecuación 29.

$$Pf = 690 * (1 + 0,0314)^{22} = 1363 \text{ habitantes}$$

Dada la libreta topográfica que se comprende de la fuente hacia donde abastecerá. Entre la estación 0 y la estación 1, determinaron una distancia medida de 27,76 metros; sin embargo, a este valor se le incrementa un 3 % por razones de diseño, así que la longitud de diseño se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Longitud de diseño} = (66) * 1,03 = 67,98 \text{ m}$$

Para este tramo, se propuso una tubería de PVC con diámetro de 2 1/2", pero en el mercado, estos diámetros son comerciales; según la tabla IV usando una presión de 250 PSI el diámetro real es de 2,573".

Para determinar el caudal medio se emplea la ecuación 32, utilizando una dotación de 60 l/hab/día.

$$Q_{md} = \frac{98 * 1\ 363}{86\ 400} = 1. L/s$$

Con este caudal se obtiene el caudal día máximo con la ecuación 33, usando un factor día máximo de 1,5.

$$Q_{max.diario} = 1,55 * 1,5 = 2,33 L/s$$

Teniendo estos datos, utilizando ecuación 27, para encontrar la pérdida del tramo, se tomará en cuenta de acuerdo a la tabla III que el coeficiente de Hazen-Williams, Ch es igual a 150.

$$hf = \frac{1743,811 * L * Q^{1,85}}{D^{4,87} * C_h^{1,85}} = \frac{1743,811 * 267,98 * 2,33^{1,85}}{2,573^{4,87} * 150^{1,85}} = 0,57 \text{ m.}$$

Según la topografía dada, la línea piezométrica de la estación 0 se encuentra en 499,00 por lo que la piezométrica de la estación 1 se obtiene restando la pérdida que existe.

$$\text{Piezométrica estación 1} = 575,59 - 0,57 = 575,02 \text{ m}$$

Para obtener la presión dinámica se resta el valor de la cota de la estación a su piezométrica.

$$\text{Presión dinámica en 1} = 575,02 - 500,87 = 74,15 \text{ m}$$

La presión estática es el resultado de restar la cota del terreno con la piezométrica de la estación 0, esta última, se hace con todas las estaciones y en este caso se le sumara una sobrepresión de 30,84.

$$\text{Presión estática en 1} = 575,02 - 500,87 + 30,84 = 105,56 \text{ m}$$

Ahora bien, el cálculo de la pérdida con la ecuación 24 que es la ecuación de Darcy-Weisbach es un tanto diferente, ya que para esta ecuación es necesario saber la temperatura ambiente y con ello se obtiene la viscosidad. Durante el desarrollo del caso, se tomaron en cuenta diferentes temperaturas las cuales fueron: 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C y 40 °C. Para el ejemplo se tomará la temperatura 20 °C. Según la tabla I, la viscosidad cinemática del agua a esa temperatura toma un valor de 0,00000102 m²/s.

Otro dato que es necesario para utilizar la ecuación es conocer la rugosidad relativa, según la tabla II el valor para la tubería PVC es de 0,0015 mm.

Se calcula la velocidad en función del caudal y la tubería del tramo.

$$v = \frac{2,33/1000}{\frac{\pi}{4} * \left(\frac{2,54 * 2,537}{100}\right)^2} = 0,71 \text{ m/s}$$

Con este valor, se calcula el número de Reynolds (valor adimensional):

$$Re = \frac{0,71 * 2,537 * \frac{2,54}{100}}{0,00000102} = 45081,008$$

Utilizando la ecuación 25 y un método iterativo, se procede a determinar el valor f para la ecuación de Darcy-Weisbach. Se propone un valor inicial f y se utiliza una parte de la ecuación 25 como se muestra de la siguiente manera.

Iteración 1:

$$f = 0,021$$

$$-2 \log \left(\frac{0,00015}{3,7 * 2,537 * 2,54} + \frac{2,51}{45081,008 * \sqrt{0,021}} \right) = 6,81675$$

Ahora se calcula la otra parte de la ecuación 25 utilizando el valor anterior de la siguiente manera.

$$\frac{1}{\sqrt{6,81675}} = 0,0215$$

El resultado con el primer valor f , si es igual o la diferencia en valor absoluto es menor a 0,0001 se toma para utilizarlo en la de Darcy-Weisbach de

lo contrario se repite el procedimiento con la diferencia que ahora este es el nuevo valor f.

$$|0,021 - 0,0215| = 0,0005 > 0,0001$$

Iteración 2:

$$f = 0,0215$$

$$-2 \log \left(\frac{0,00015}{3,7 * 2,537 * 2,54} + \frac{2,51}{45081,008 * \sqrt{0,0215}} \right) = 6,82721$$

$$\frac{1}{\sqrt{6,82721}} = 0,0214$$

$$|0,0215 - 0,0214| = 0,0001 = 0,0001$$

Iteración 3:

$$f = 0,0214$$

$$-2 \log \left(\frac{0,00015}{3,7 * 2,537 * 2,54} + \frac{2,51}{45081,008 * \sqrt{0,0214}} \right) = 6,82589$$

$$\frac{1}{\sqrt{6,82589}} = 0,0214$$

$$|0,0214 - 0,0214| = 0,0000 < 0,0001$$

f para la ecuación de Darcy-Weisbach es de 0,0214.

Por lo que la pérdida es igual.

$$hf = f \frac{L}{d^5} \frac{v^2}{2g} = 0,0214 * \frac{28,59}{\left(2,193 * \frac{2,54}{100}\right)^5} * \frac{0,447^2}{2 * 9,81} = 0,59 \text{ m}$$

$$\text{Piezométrica estación 1} = 575,59 - 0,59 = 575,00 \text{ m}$$

$$\text{Presión dinámica en 1} = 575,59 - 500,87 = 74,13 \text{ m}$$

Se presentan en las siguientes tablas, los valores resúmenes de los cálculos realizados para todas las estaciones descritas según la libreta topográfica:

Tabla XIV. Datos del caso 3

Est.	P.O.	Dist. M. (m)	Dist. Acum. (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de Trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
Línea de conducción												
0	0,5	66,00	66,00	500,87	67,98	2 1/2	2,537	PVC	250	150	2,33	0,71
0	1	104,28	104,28	506,16	107,41	2 1/2	2,537	PVC	250	150	2,33	0,71
1	2	36,14	140,43	510,69	37,23	2 1/2	2,537	PVC	250	150	2,33	0,71
2	3	74,71	215,14	513,78	76,95	2 1/2	2,537	PVC	250	150	2,33	0,71
Est.	P.O.	Dist. M. (m)	Dist. Acum. (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de Trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
3	4	109,97	325,11	524,88	113,27	2 1/2	2,655	PVC	160	150	2,33	0,65
4	5	27,36	352,47	529,47	28,19	2 1/2	2,655	PVC	160	150	2,33	0,65
5	5,01	12,75	365,22	532,77	13,13	2 1/2	2,655	PVC	160	150	2,33	0,65
5	6	109,56	462,03	568,27	112,84	2 1/2	2,655	PVC	160	150	2,33	0,65
6	7	9,32	471,35	569,53	9,60	2 1/2	2,655	PVC	160	150	2,33	0,65
7	6	9,32	462,03	568,27	9,60	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
6	5	109,56	339,72	529,47	112,84	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
5	5,1	12,75	449,28	532,77	13,13	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
5	4	27,36	312,36	524,88	28,19	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
4	3	109,97	202,39	513,78	113,27	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
3	2	74,71	127,68	510,69	76,95	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
2	1	36,14	91,53	506,16	37,23	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
7	8	18,84	490,19	568,29	19,41	2	2,193	PVC	160	140	1,79	0,73
8	9	107,85	598,04	557,63	111,09	2	2,193	PVC	160	140	1,79	0,73
9	10	122,07	720,11	547,53	125,73	2	2,193	PVC	160	140	1,79	0,73
10	11	63,99	784,11	548,83	65,91	1 1/2	1,754	PVC	160	140	1,59	1,02
11	12	44,45	828,56	546,73	45,78	1 1/2	1,754	PVC	160	140	1,59	1,02

Continuación de la tabla XIV.

12	52	13,82	842,37	545,55	14,23	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
52	53	57,32	899,69	533,59	59,04	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
53	54	44,74	944,43	526,55	46,08	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
54	55	37,72	982,16	520,06	38,86	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
10	56	19,22	739,34	544,24	19,80	1	1,195	PVC	160	140	0,81	1,12
56	57	44,95	784,29	532,00	46,30	1	1,195	PVC	160	140	0,81	1,12
57	58	22,34	806,63	525,39	23,01	1	1,195	PVC	160	140	0,81	1,12
58	59	46,95	853,58	524,34	48,36	1	1,195	PVC	160	140	0,81	1,12
59	61	47,94	901,52	523,14	49,38	3/4	0,926	PVC	250	140	0,62	1,42
61	62	35,08	936,60	517,94	36,14	3/4	0,926	PVC	250	140	0,62	1,42
62	63	64,55	1001,15	513,03	66,48	3/4	0,926	PVC	250	140	0,62	1,42
59	60	21,44	875,02	521,37	22,09	3/4	0,926	PVC	250	140	0,40	0,91
12	13	52,79	881,34	546,29	54,37	1 1/2	1,754	PVC	160	140	1,54	0,99
13	14	34,47	915,82	542,51	35,51	1 1/2	1,754	PVC	160	140	1,54	0,99
14	15	62,18	977,99	544,18	64,04	1 1/2	1,754	PVC	160	140	1,54	0,99
15	16	52,86	1030,85	546,20	54,44	1 1/2	1,754	PVC	160	140	1,07	0,69
16	37	13,58	1044,43	544,21	13,98	3/4	0,926	PVC	250	140	0,40	0,91
Est.	P.O.	Dist. M. (m)	Dist. Acum. (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de Trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
37	38	28,41	1072,84	536,05	29,27	3/4	0,926	PVC	250	140	0,40	0,91
15	43	16,23	994,22	542,23	16,72	1	1,195	PVC	160	140	0,98	1,36
43	44	39,64	1033,86	529,47	40,82	1	1,195	PVC	160	140	0,98	1,36
44	45	56,32	1090,18	520,24	58,01	1	1,195	PVC	160	140	0,98	1,36
45	48	44,42	1134,60	515,71	45,75	3/4	0,926	PVC	250	140	0,58	1,34
48	49	44,24	1178,84	513,45	45,57	3/4	0,926	PVC	250	140	0,58	1,34
49	50	54,59	1233,42	509,15	56,22	3/4	0,926	PVC	250	140	0,58	1,34
50	51	81,96	1315,38	507,83	84,42	3/4	0,926	PVC	250	140	0,58	1,34
15	39	11,81	989,80	543,17	12,16	3/4	0,926	PVC	250	140	0,40	0,91
39	40	43,19	1032,99	526,46	44,49	3/4	0,926	PVC	250	140	0,40	0,91
40	41	61,97	1094,97	511,11	63,83	3/4	0,926	PVC	250	140	0,40	0,91
41	42	70,33	1165,30	485,55	72,44	3/4	0,926	PVC	250	140	0,40	0,91
45	46	90,96	1181,14	518,92	93,69	3/4	0,926	PVC	250	140	0,50	1,15
45	47	117,99	1208,17	522,09	121,53	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
16	17	85,34	1116,19	541,91	87,90	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,98	0,63
17	18	50,76	1166,96	545,86	52,29	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,98	0,63
18	19	32,00	1198,96	546,50	32,96	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,84	0,54
19	20	57,85	1256,81	544,11	59,59	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,84	0,54
20	24	69,63	1326,44	549,59	71,72	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,65	0,42
24	25	67,96	1394,41	544,64	70,00	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,65	0,42
25	26	97,08	1491,48	514,04	99,99	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
26	27	132,58	1624,07	486,27	136,56	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
27	28	88,65	1712,72	492,32	91,31	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
28	29	59,09	1771,80	482,14	60,86	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
29	30	51,10	1822,90	468,52	52,63	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
25	31	33,40	1427,81	540,62	34,41	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
31	32	12,44	1440,25	538,46	12,81	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
32	33	60,08	1500,32	514,46	61,88	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
33	34	46,31	1546,63	506,07	47,70	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
18	35	17,95	1184,91	545,41	18,49	3/4	0,926	PVC	250	140	0,26	0,60
35	36	40,81	1225,72	536,33	42,03	3/4	0,926	PVC	250	140	0,26	0,60
20	21	81,97	1338,78	543,02	84,43	1	1,161	PVC	250	140	0,50	0,73
21	22	39,66	1378,44	536,61	40,85	3/4	0,926	PVC	250	140	0,50	1,15
22	23	32,93	1411,38	526,04	33,92	3/4	0,926	PVC	250	140	0,50	1,15

Continuación de la tabla XIV.

Est.	P.O.	Dist. M. (m)	Dist. Acum. (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de Trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
7	64	30,91	502,26	568,37	31,84	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,62	0,40
64	65	29,62	531,88	563,78	30,51	1 1/2	1,754	PVC	160	140	0,62	0,40
65	67	13,16	545,04	559,83	13,55	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
67	68	87,31	632,35	536,11	89,93	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
68	69	32,84	665,19	526,35	33,83	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
69	70	77,80	742,99	522,88	80,14	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
70	71	26,09	769,09	515,21	26,88	1	1,195	PVC	160	140	0,54	0,75
71	72	19,40	788,48	510,04	19,98	1	1,195	PVC	160	140	0,54	0,75
72	73	51,11	839,59	491,75	52,65	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
73	74	40,97	880,56	493,38	42,20	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
74	75	17,31	897,88	490,45	17,83	3/4	0,926	PVC	250	140	0,54	1,24
75	76	68,85	966,73	476,20	70,91	1	1,195	PVC	160	140	0,54	0,75
65	66	45,10	576,97	557,80	46,45	3/4	0,926	PVC	250	140	0,15	0,35
7	77	14,73	486,08	568,99	15,17	2	2,193	PVC	160	140	1,19	0,49
77	78	55,99	542,07	564,69	57,67	2	2,193	PVC	160	140	1,19	0,49
78	79	53,25	595,32	558,08	54,85	2	2,193	PVC	160	140	1,19	0,49
79	80	42,00	637,32	558,36	43,26	2	2,193	PVC	160	140	1,19	0,49
80	82	115,00	752,32	544,46	118,45	1 1/4	1,532	PVC	160	140	1,17	0,99
82	83	51,42	803,74	534,87	52,96	1 1/4	1,532	PVC	160	140	1,17	0,99
83	85	32,00	835,73	535,09	32,96	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,45	0,38
85	86	84,98	920,72	536,70	87,53	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,45	0,38
86	87	30,00	950,72	537,26	30,90	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,45	0,38
87	88	30,00	980,72	538,07	30,90	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,45	0,38
88	89	61,98	1042,70	539,69	63,84	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,45	0,38
89	90	44,99	1087,68	541,04	46,33	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,45	0,38
90	91	33,99	1121,67	542,06	35,01	1	1,195	PVC	160	140	0,45	0,62
91	92	26,98	1148,65	543,33	27,79	1	1,195	PVC	160	140	0,45	0,62
92	93	93,38	1242,03	545,14	96,18	1	1,195	PVC	160	140	0,45	0,62
93	94	21,00	1263,03	545,57	21,63	1	1,195	PVC	160	140	0,45	0,62
94	95	46,39	1309,42	524,86	47,78	3/4	0,926	PVC	250	140	0,45	1,04
95	96	70,92	1380,34	522,83	73,05	3/4	0,926	PVC	250	140	0,45	1,04
96	97	66,31	1446,65	516,53	68,30	3/4	0,926	PVC	250	140	0,45	1,04
80	81	82,12	719,44	531,83	84,58	3/4	0,926	PVC	250	140	0,15	0,35
Est.	P.O.	Dist. M. (m)	Dist. Acum. (m)	Cota (m)	L. Diseño (m)	d Nom. (")	d Int. (")	Clase de tubería	Presión de Trabajo (PSI)	C _h	Q (l/s)	V (m/s)
83	84	83,52	887,26	528,96	86,03	3/4	0,926	PVC	250	140	0,34	0,77
83	98	71,44	875,17	525,40	73,58	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,94	0,79
98	99	152,21	1027,38	514,88	156,77	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,94	0,79
99	100	58,77	1086,15	514,01	60,53	1 1/4	1,532	PVC	160	140	0,94	0,79
100	101	62,81	1148,96	511,04	64,69	1	1,195	PVC	160	140	0,94	1,29
101	102	75,76	1224,72	507,29	78,04	1	1,195	PVC	160	140	0,94	1,29
102	103	35,99	1260,71	508,19	37,07	1	1,195	PVC	160	140	0,75	1,04
103	105	51,98	1312,69	507,66	53,54	1	1,195	PVC	160	140	0,75	1,04
105	106	24,79	1337,49	505,90	25,54	1	1,195	PVC	160	140	0,75	1,04
106	107	62,94	1400,42	508,38	64,82	1	1,195	PVC	160	140	0,75	1,04
107	108	60,99	1461,41	507,95	62,82	1	1,195	PVC	160	140	0,58	0,80
108	109	40,52	1501,93	506,65	41,74	1	1,195	PVC	160	140	0,58	0,80
109	110	42,54	1544,47	502,72	43,82	1	1,195	PVC	160	140	0,58	0,80
110	111	54,92	1599,39	505,30	56,56	1	1,195	PVC	160	140	0,58	0,80
111	112	69,90	1669,28	508,46	71,99	1	1,195	PVC	160	140	0,58	0,80
112	113	50,99	1720,28	508,38	52,52	1	1,195	PVC	160	140	0,58	0,80
113	114	56,00	1776,27	508,29	57,68	1	1,195	PVC	160	140	0,58	0,80

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. Pérdidas del caso 3

Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
Línea de conducción									
0	0,5	0,57240	0,66496	0,64336	0,62058	0,60355	0,58755	0,55750	0,53388
0	1	0,90448	1,05073	1,01660	0,98061	0,95370	0,92842	0,88093	0,84361
1	2	0,31349	0,36418	0,35235	0,33987	0,33055	0,32178	0,30533	0,29239
2	3	0,64795	0,75272	0,72827	0,70249	0,68321	0,66510	0,63108	0,60434
3	4	0,76437	0,89219	0,86306	0,83234	0,80937	0,78780	0,74728	0,71544
4	5	0,19020	0,22201	0,21476	0,20711	0,20140	0,19603	0,18595	0,17802
5	5,01	0,08863	0,10345	0,10007	0,09651	0,09385	0,09134	0,08665	0,08295
5	6	0,76148	0,88883	0,85980	0,82920	0,80632	0,78483	0,74446	0,71274
6	7	0,06478	0,07562	0,07315	0,07054	0,06860	0,06677	0,06333	0,06064
7	6	0,83600	0,87600	0,84637	0,81523	0,79201	0,77025	0,72953	0,69769
Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
6	5	9,82668	10,29691	9,94866	9,58258	9,30962	9,05388	8,57527	8,20095
5	5,1	1,14370	1,19843	1,15790	1,11529	1,08352	1,05376	0,99805	0,95449
5	4	2,45446	2,57192	2,48493	2,39350	2,32532	2,26144	2,14189	2,04840
4	3	9,86390	10,33592	9,98634	9,61888	9,34488	9,08817	8,60776	8,23202
3	2	6,70091	7,02157	6,78409	6,53446	6,34832	6,17393	5,84756	5,59231
2	1	3,24199	3,39713	3,28223	3,16146	3,07140	2,98703	2,82913	2,70564
7	8	0,23168	0,23875	0,23090	0,22263	0,21645	0,21065	0,19976	0,19121
8	9	1,32621	1,36667	1,32175	1,27441	1,23903	1,20582	1,14347	1,09450
9	10	1,50102	1,54682	1,49597	1,44240	1,40236	1,36476	1,29419	1,23877
10	11	1,87497	1,90730	1,84548	1,78032	1,73162	1,68590	1,60007	1,53268
11	12	1,30241	1,32487	1,28193	1,23667	1,20284	1,17108	1,11146	1,06465
12	52	0,51207	0,56380	0,54361	0,52243	0,50667	0,49192	0,46438	0,44288
52	53	2,12433	2,33891	2,25516	2,16730	2,10191	2,04073	1,92646	1,83727
53	54	1,65813	1,82563	1,76025	1,69168	1,64064	1,59288	1,50369	1,43408
54	55	1,39809	1,53932	1,48419	1,42637	1,38333	1,34307	1,26787	1,20917
10	56	1,04603	1,08537	1,04916	1,01106	0,98263	0,95597	0,90602	0,86690
56	57	2,44601	2,53799	2,45332	2,36423	2,29775	2,23541	2,11860	2,02712
57	58	1,21536	1,26106	1,21899	1,17473	1,14169	1,11072	1,05268	1,00722
58	59	2,55475	2,65082	2,56239	2,46934	2,39990	2,33479	2,21279	2,11724
59	61	5,51116	5,70231	5,51253	5,31294	5,16406	5,02452	4,76328	4,55889
61	62	4,03313	4,17302	4,03414	3,88808	3,77912	3,67701	3,48583	3,33625
62	63	7,42029	7,67766	7,42214	7,15342	6,95295	6,76508	6,41335	6,13815
59	60	1,08491	1,17292	1,13176	1,08854	1,05635	1,02622	0,96990	0,92591
12	13	1,46984	1,49874	1,45001	1,39865	1,36027	1,32424	1,25661	1,20352
13	14	0,95993	0,97880	0,94697	0,91344	0,88837	0,86484	0,82067	0,78600
14	15	1,73138	1,76542	1,70802	1,64753	1,60232	1,55988	1,48021	1,41767
15	16	0,74807	0,78876	0,76203	0,73390	0,71291	0,69323	0,65633	0,62740
16	37	0,68684	0,74255	0,71649	0,68913	0,66875	0,64968	0,61403	0,58617
37	38	1,43748	1,55409	1,49955	1,44229	1,39964	1,35972	1,28510	1,22680
15	43	1,27138	1,29601	1,25376	1,20928	1,17606	1,14490	1,08647	1,04068
43	44	3,10475	3,16490	3,06172	2,95309	2,87197	2,79586	2,65319	2,54138
44	45	4,41169	4,49716	4,35055	4,19619	4,08092	3,97278	3,77005	3,61117
45	48	4,54790	4,73317	4,57445	4,40758	4,28311	4,16648	3,94817	3,77739
48	49	4,52960	4,71412	4,55605	4,38984	4,26588	4,14972	3,93228	3,76219
49	50	5,58900	5,81669	5,62164	5,41656	5,26360	5,12027	4,85198	4,64210
Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
50	51	8,39165	8,73351	8,44066	8,13274	7,90308	7,68788	7,28505	6,96993
15	39	0,59732	0,64577	0,62311	0,59932	0,58159	0,56501	0,53400	0,50978
39	40	2,18515	2,36242	2,27950	2,19246	2,12763	2,06694	1,95351	1,86489
40	41	3,13549	3,38984	3,27087	3,14597	3,05295	2,96587	2,80310	2,67595
41	42	3,55834	3,84700	3,71198	3,57024	3,46467	3,36585	3,18113	3,03683
45	46	6,99063	7,38508	7,13279	6,86769	6,67007	6,48496	6,13863	5,86784
45	47	4,37271	4,81441	4,64201	4,46116	4,32656	4,20064	3,96543	3,78184
16	17	1,03149	1,09671	1,05918	1,01971	0,99026	0,96265	0,91092	0,87039
17	18	0,61357	0,65237	0,63004	0,60657	0,58905	0,57262	0,54185	0,51774

Continuación de la tabla XV.

18	19	0,28576	0,30891	0,29814	0,28682	0,27839	0,27048	0,25567	0,24409
19	20	0,51663	0,55849	0,53902	0,51856	0,50330	0,48901	0,46224	0,44129
20	24	0,39537	0,43881	0,42308	0,40656	0,39426	0,38275	0,36122	0,34439
24	25	0,38590	0,42830	0,41295	0,39683	0,38482	0,37358	0,35257	0,33614
25	26	3,59777	3,96119	3,81934	3,67055	3,55980	3,45619	3,26267	3,11161
26	27	4,91373	5,41009	5,21635	5,01313	4,86188	4,72037	4,45606	4,24975
27	28	3,28547	3,61735	3,48781	3,35193	3,25079	3,15618	2,97945	2,84151
28	29	2,18986	2,41107	2,32473	2,23416	2,16675	2,10369	1,98589	1,89395
29	30	1,89376	2,08506	2,01039	1,93207	1,87378	1,81924	1,71737	1,63786
25	31	1,23798	1,36303	1,31422	1,26302	1,22491	1,18926	1,12267	1,07069
31	32	0,46097	0,50753	0,48936	0,47029	0,45610	0,44283	0,41803	0,39868
32	33	2,22649	2,45140	2,36362	2,27153	2,20300	2,13888	2,01911	1,92563
33	34	1,71626	1,88962	1,82195	1,75097	1,69814	1,64872	1,55640	1,48434
18	35	0,41476	0,47029	0,45292	0,43473	0,42121	0,40856	0,38499	0,36661
35	36	0,94289	1,06912	1,02965	0,98829	0,95754	0,92881	0,87520	0,83342
20	21	2,09407	2,27255	2,19260	2,10866	2,04612	1,98756	1,87806	1,79246
21	22	3,04825	3,22024	3,11024	2,99464	2,90847	2,82775	2,67674	2,55866
22	23	2,53110	2,67391	2,58257	2,48658	2,41503	2,34801	2,22261	2,12457
7	64	0,15836	0,17686	0,17047	0,16378	0,15879	0,15412	0,14540	0,13858
64	65	0,15173	0,16945	0,16334	0,15692	0,15214	0,14767	0,13931	0,13278
65	67	1,18037	1,23685	1,19502	1,15105	1,11826	1,08754	1,03005	0,98509
67	68	7,83113	8,20587	7,92833	7,63660	7,41907	7,21526	6,83385	6,53554
68	69	2,94588	3,08685	2,98245	2,87271	2,79088	2,71421	2,57073	2,45852
69	70	6,97854	7,31248	7,06516	6,80519	6,61134	6,42973	6,08984	5,82401
70	71	0,67596	0,72971	0,70420	0,67740	0,65743	0,63873	0,60375	0,57639
71	72	0,50245	0,54240	0,52344	0,50352	0,48868	0,47478	0,44877	0,42844
Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0 °C)	hf (m) T (5 °C)	hf (m) T (10 °C)	hf (m) T (15 °C)	hf (m) T (20 °C)	hf (m) T (30 °C)	hf (m) T (40 °C)
72	73	4,58451	4,80389	4,64141	4,47063	4,34328	4,22397	4,00068	3,82605
73	74	3,67462	3,85046	3,72023	3,58334	3,48127	3,38563	3,20666	3,06669
74	75	1,55307	1,62739	1,57235	1,51449	1,47135	1,43093	1,35529	1,29613
75	76	1,78354	1,92536	1,85805	1,78734	1,73465	1,68531	1,59301	1,52083
65	66	0,37715	0,45898	0,44086	0,42193	0,40791	0,39483	0,37051	0,35163
7	77	0,08540	0,09146	0,08831	0,08500	0,08254	0,08022	0,07588	0,07248
77	78	0,32464	0,34767	0,33571	0,32313	0,31375	0,30495	0,28846	0,27554
78	79	0,30878	0,33069	0,31931	0,30735	0,29842	0,29005	0,27437	0,26208
79	80	0,24352	0,26080	0,25183	0,24239	0,23535	0,22875	0,21638	0,20669
80	82	3,71259	3,82439	3,69822	3,56537	3,46614	3,37304	3,19842	3,06147
82	83	1,66004	1,71003	1,65362	1,59421	1,54984	1,50821	1,43014	1,36890
83	85	0,17594	0,20020	0,19283	0,18509	0,17934	0,17397	0,16393	0,15609
85	86	0,46727	0,53170	0,51212	0,49158	0,47631	0,46203	0,43537	0,41456
86	87	0,16495	0,18769	0,18078	0,17353	0,16814	0,16310	0,15369	0,14634
87	88	0,16494	0,18768	0,18076	0,17352	0,16813	0,16308	0,15367	0,14633
88	89	0,34079	0,38778	0,37349	0,35852	0,34738	0,33696	0,31752	0,30234
89	90	0,24734	0,28145	0,27108	0,26021	0,25213	0,24457	0,23045	0,21944
90	91	0,62666	0,69000	0,66535	0,63948	0,62022	0,60219	0,56850	0,54218
91	92	0,49735	0,54761	0,52805	0,50752	0,49223	0,47792	0,45119	0,43030
92	93	1,72149	1,89548	1,82776	1,75670	1,70379	1,65427	1,56171	1,48941
93	94	0,38715	0,42628	0,41105	0,39507	0,38317	0,37203	0,35121	0,33495
94	95	2,96137	3,16011	3,05085	2,93609	2,85058	2,77050	2,62073	2,50367
95	96	4,52703	4,83086	4,66384	4,48840	4,35767	4,23525	4,00630	3,82736
96	97	4,23294	4,51703	4,36086	4,19682	4,07458	3,96012	3,74604	3,57872
80	81	0,68677	0,83576	0,80277	0,76831	0,74277	0,71896	0,67468	0,64030
83	84	3,09549	3,40817	3,28613	3,15810	3,06282	2,97367	2,80717	2,67720
83	98	1,52480	1,60379	1,54951	1,49241	1,44979	1,40983	1,33495	1,27628
98	99	3,24883	3,41714	3,30149	3,17982	3,08902	3,00388	2,84434	2,71932
99	100	1,25441	1,31940	1,27475	1,22777	1,19271	1,15984	1,09824	1,04997
100	101	4,49508	4,60186	4,45098	4,29215	4,17355	4,06230	3,85378	3,69037
101	102	5,42235	5,55117	5,36916	5,17756	5,03450	4,90030	4,64876	4,45165
102	103	1,70729	1,78388	1,72385	1,66071	1,61360	1,56943	1,48670	1,42192
103	105	2,46558	2,57619	2,48949	2,39830	2,33027	2,26649	2,14701	2,05346

Continuación de la tabla XV.

105	106	1,17594	1,22869	1,18734	1,14385	1,11140	1,08098	1,02400	0,97938
106	107	2,98524	3,11916	3,01419	2,90379	2,82141	2,74419	2,59953	2,48626
Est.	P.O.	hf (m)	hf (m) T (0°C)	hf (m) T (5°C)	hf (m) T (10°C)	hf (m) T (15°C)	hf (m) T (20°C)	hf (m) T (30°C)	hf (m) T (40°C)
107	108	1,80343	1,93245	1,86545	1,79506	1,74258	1,69343	1,60145	1,52950
108	109	1,19829	1,28402	1,23950	1,19272	1,15786	1,12520	1,06408	1,01627
109	110	1,25799	1,34800	1,30126	1,25215	1,21555	1,18126	1,11710	1,06691
110	111	1,62396	1,74015	1,67981	1,61642	1,56917	1,52490	1,44208	1,37729
111	112	2,06693	2,21480	2,13801	2,05733	1,99719	1,94085	1,83544	1,75297
112	113	1,50799	1,61587	1,55985	1,50099	1,45711	1,41601	1,33909	1,27893
113	114	1,65587	1,77434	1,71282	1,64818	1,60000	1,55487	1,47041	1,40435

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Piezométricas del caso 3**

Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
Línea de conducción									
		575.59394	575.59394	575.59394	575.59394	575.59394	575.59394	575.59394	575.59394
0	0.5	575.02154	574.92898	574.95058	574.97336	574.99039	575.00639	575.03644	575.06006
0	1	574.68946	573.87825	573.93399	573.99275	574.03669	574.07797	574.15551	574.21646
1	2	574.37598	573.51407	573.58164	573.65288	573.70615	573.75618	573.85018	573.92407
2	3	573.72803	572.76135	572.85337	572.95039	573.02294	573.09108	573.21910	573.31973
3	4	572.96366	571.86916	571.99032	572.11805	572.21357	572.30329	572.47182	572.60429
4	5	572.77346	571.64715	571.77556	571.91094	572.01217	572.10726	572.28588	572.42627
5	5.01	572.68484	571.54370	571.67549	571.81443	571.91833	572.01591	572.19923	572.34331
5	6	572.01198	570.65488	570.81569	570.98523	571.11201	571.23108	571.45477	571.63058
6	7	571.94720	570.57926	570.74255	570.91469	571.04341	571.16432	571.39144	571.56994
7	6	567.69363	567.65362	567.68325	567.71439	567.73762	567.75937	567.80009	567.83194
6	5	557.86695	557.35671	557.73460	558.13181	558.42800	558.70550	559.22482	559.63098
5	5.1	556.72324	556.15828	556.57670	557.01652	557.34447	557.65174	558.22676	558.67649
5	4	554.26878	553.58636	554.09177	554.62302	555.01916	555.39030	556.08487	556.62810
4	3	544.40488	543.25044	544.10543	545.00414	545.67428	546.30213	547.47711	548.39608
3	2	537.70396	536.22887	537.32134	538.46968	539.32595	540.12820	541.62955	542.80377
2	1	534.46197	532.83174	534.03910	535.30822	536.25455	537.14117	538.80042	540.09813
7	8	568.29794	568.29087	568.29872	568.30699	568.31317	568.31897	568.32986	568.33842
8	9	566.97173	566.92420	566.97697	567.03258	567.07414	567.11315	567.18640	567.24392
9	10	565.47071	565.37738	565.48100	565.59018	565.67178	565.74839	565.89220	566.00514
Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
10	11	563.59574	563.47008	563.63552	563.80986	563.94016	564.06249	564.29213	564.47246
11	12	562.29333	562.14520	562.35360	562.57319	562.73732	562.89141	563.18068	563.40781
12	52	561.78126	561.58140	561.80999	562.05076	562.23065	562.39949	562.71630	562.96493
52	53	559.65693	559.24249	559.55483	559.88346	560.12875	560.35876	560.78984	561.12766
53	54	557.99880	557.41686	557.79458	558.19178	558.48811	558.76587	559.28615	559.69359
54	55	556.60071	555.87755	556.31038	556.76541	557.10478	557.42280	558.01828	558.48442
10	56	564.42468	564.29201	564.43184	564.57912	564.68915	564.79242	564.98618	565.13825
56	57	561.97867	561.75402	561.97852	562.21489	562.39141	562.55701	562.86758	563.11113
57	58	560.76331	560.49296	560.75953	561.04016	561.24971	561.44629	561.81490	562.10390
58	59	558.20856	557.84214	558.19715	558.57082	558.84982	559.11151	559.60210	559.98667
59	61	552.69740	552.13984	552.68462	553.25788	553.68576	554.08699	554.83882	555.42778
61	62	548.66427	547.96682	548.65048	549.36980	549.90664	550.40998	551.35299	552.09153
62	63	541.24398	540.28916	541.22834	542.21638	542.95368	543.64490	544.93965	545.95338
59	60	557.12365	556.66922	557.06539	557.48228	557.79346	558.08529	558.63220	559.06076

Continuación de la tabla XVI.

12	13	560.82349	560.64646	560.90359	561.17454	561.37705	561.56717	561.92406	562.20429
13	14	561.33340	559.66766	559.95661	560.26110	560.48867	560.70233	561.10339	561.41829
14	15	560.56195	557.90224	558.24860	558.61357	558.88636	559.14245	559.62318	560.00062
15	16	559.81387	557.11348	557.48657	557.87967	558.17345	558.44923	558.96685	559.37322
16	37	559.12704	556.37093	556.77008	557.19054	557.50469	557.79955	558.35283	558.78705
37	38	557.68956	554.81683	555.27053	555.74825	556.10505	556.43983	557.06773	557.56024
15	43	559.29057	556.60623	556.99483	557.40429	557.71030	557.99756	558.53671	558.95994
43	44	556.18582	553.44133	553.93311	554.45120	554.83833	555.20169	555.88352	556.41856
44	45	551.77413	548.94417	549.58256	550.25501	550.75741	551.22891	552.11346	552.80739
45	48	547.22623	544.21100	545.00810	545.84743	546.47430	547.06243	548.16530	549.03001
48	49	542.69663	539.49687	540.45205	541.45759	542.20842	542.91271	544.23302	545.26782
49	50	537.10763	533.68019	534.83041	536.04103	536.94482	537.79243	539.38103	540.62572
50	51	528.71598	524.94667	526.38976	527.90830	529.04174	530.10456	532.09598	533.65579
15	39	561.69601	561.49943	561.73049	561.97387	562.15573	562.32640	562.64668	562.89804
39	40	560.10818	559.13701	559.45098	559.78141	560.02810	560.25946	560.69317	561.03314
40	41	522.82349	523.06913	523.18810	523.31300	523.40603	523.49310	557.89007	523.78303
41	42	519.26515	519.22213	519.47612	519.74276	519.94136	520.12726	554.70894	520.74620
45	46	544.78350	541.55909	542.44977	543.38732	544.08735	544.74395	545.97483	546.93955
45	47	547.40142	544.12975	544.94055	545.79385	546.43085	547.02827	548.14804	549.02556
16	17	558.78239	556.01677	556.42739	556.85996	557.18319	557.48658	558.05594	558.50283
17	18	558.16881	555.36440	555.79734	556.25339	556.59414	556.91395	557.51408	557.98509
Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
18	19	557.88306	555.05549	555.49920	555.96657	556.31575	556.64348	557.25841	557.74100
19	20	557.36643	554.49700	554.96018	555.44801	555.81245	556.15447	556.79617	557.29971
20	24	556.97107	554.05819	554.53710	555.04145	555.41819	555.77172	556.43495	556.95532
24	25	556.58517	553.62988	554.12416	554.64462	555.03337	555.39814	556.08238	556.61918
25	26	540.54293	549.66869	550.30481	550.97407	551.47357	551.94195	552.81972	553.00757
26	27	508.62893	508.63257	508.82631	509.02953	509.18079	509.32229	548.36366	509.79291
27	28	503.81373	503.33096	503.71455	504.11692	504.41640	504.69657	543.99695	505.62837
28	29	501.62386	500.91989	501.38982	501.88276	502.24965	502.59289	542.01105	503.73442
29	30	499.73010	498.83483	499.37943	499.95069	500.37587	500.77365	540.29368	502.09655
25	31	542.90272	542.77767	542.82648	542.87768	542.91579	542.95144	543.01803	543.07001
31	32	542.44176	542.27014	542.33712	542.40739	542.45969	542.50861	542.60000	542.67133
32	33	540.21526	539.81874	539.97351	540.13585	540.25669	540.36973	540.58089	540.74570
33	34	538.49901	537.92911	538.15155	538.38488	538.55855	538.72102	539.02448	539.26135
18	35	557.75406	554.89411	555.34442	555.81866	556.17293	556.50539	557.12910	557.61848
35	36	556.81117	553.82499	554.31478	554.83037	555.21539	555.57658	556.25390	556.78506
20	21	555.27236	552.22445	552.76758	553.33935	553.76633	554.16691	554.91811	555.50725
21	22	552.22411	549.00421	549.65734	550.34472	550.85787	551.33916	552.24137	552.94859
22	23	549.69302	546.33029	547.07477	547.85813	548.44284	548.99115	550.01876	550.82402
7	64	568.37127	568.35277	568.35915	568.36585	568.37083	568.37550	568.38422	568.39104
64	65	568.21954	568.18331	568.19581	568.20893	568.21869	568.22783	568.24491	568.25826
65	67	567.03917	566.94646	567.00079	567.05788	567.10043	567.14029	567.21486	567.27317
67	68	559.20804	558.74059	559.07246	559.42128	559.68136	559.92503	560.38101	560.73762
68	69	556.26216	555.65374	556.09001	556.54857	556.89049	557.21082	557.81028	558.27911
69	70	549.28362	544.85913	545.66049	546.50282	547.13089	547.71933	548.82052	549.68177
70	71	521.70743	522.15368	522.17920	522.20599	522.22596	522.24466	522.27965	522.30700
71	72	521.20498	521.61128	521.65576	521.70247	521.73728	521.76989	521.83087	521.87856
72	73	516.62048	516.80739	517.01434	517.23184	517.39401	517.54592	517.83019	518.05251
73	74	512.94586	512.95693	513.29412	513.64851	513.91274	514.16029	514.62353	514.98583
74	75	511.39279	511.32955	511.72177	512.13402	512.44139	512.72936	513.26824	513.68970
75	76	488.16186	508.31204	508.80976	509.33282	509.72277	510.08807	510.77162	511.30619
65	66	567.84239	567.72434	567.75496	567.78699	567.81078	567.83300	567.87440	567.90662
7	77	568.44422	568.43816	568.44131	568.44462	568.44709	568.44940	568.45374	568.45714
77	78	568.11959	568.09050	568.10560	568.12149	568.13334	568.14446	568.16528	568.18160
78	79	567.81081	567.75981	567.78629	567.81414	567.83492	567.85440	567.89091	567.91952
79	80	567.56728	567.49901	567.53446	567.57175	567.59957	567.62565	567.67453	567.71283

Continuación de la tabla XVI.

Est.	P.O.	Piez (m)	Piez (m) T (0 °C)	Piez (m) T (5 °C)	Piez(m) T (10 °C)	Piez (m) T (15 °C)	Piez (m) T (20 °C)	Piez (m) T (30 °C)	Piez (m) T (40 °C)
80	82	563.85470	563.67462	563.83624	564.00638	564.13343	564.25261	564.47610	564.65136
82	83	562.19466	561.96459	562.18262	562.41217	562.58358	562.74440	563.04597	563.28246
83	85	562.01871	561.76439	561.98980	562.22707	562.40424	562.57043	562.88204	563.12637
85	86	561.55144	561.23269	561.47768	561.73549	561.92793	562.10840	562.44667	562.71181
86	87	561.38649	561.04500	561.29690	561.56195	561.75979	561.94530	562.29299	562.56546
87	88	561.22155	560.85732	561.11614	561.38844	561.59166	561.78222	562.13932	562.41914
88	89	560.88077	560.46954	560.74265	561.02992	561.24428	561.44525	561.82180	562.11679
89	90	560.63342	560.18810	560.47157	560.76971	560.99215	561.20069	561.59135	561.89735
90	91	560.00676	559.49809	559.80622	560.13023	560.37193	560.59849	561.02284	561.35517
91	92	559.50942	558.95048	559.27817	559.62271	559.87970	560.12057	560.57166	560.92487
92	93	557.78793	557.05501	557.45041	557.86601	558.17592	558.46630	559.00995	559.43546
93	94	557.40078	556.62873	557.03936	557.47094	557.79275	558.09427	558.65873	559.10051
94	95	554.43942	553.46862	553.98851	554.53485	554.94217	555.32378	556.03800	556.59684
95	96	549.91239	548.63776	549.32468	550.04645	550.58450	551.08853	552.03170	552.76948
96	97	545.67944	544.12073	544.96382	545.84963	546.50992	547.12841	548.28566	549.19076
80	81	566.88052	566.66325	566.73170	566.80344	566.85680	566.90670	566.99985	567.07253
83	84	559.09917	558.55642	558.89650	559.25406	559.52076	559.77072	560.23880	560.60526
83	98	560.66986	560.36080	560.63311	560.91976	561.13379	561.33456	561.71101	562.00618
98	99	557.42103	556.94366	557.33162	557.73993	558.04477	558.33068	558.86667	559.28686
99	100	556.16662	555.62425	556.05687	556.51216	556.85205	557.17084	557.76844	558.23689
100	101	551.67154	551.02239	551.60589	552.22002	552.67851	553.10854	553.91466	554.54652
101	102	546.24919	545.47122	546.23673	547.04245	547.64401	548.20823	549.26590	550.09487
102	103	544.54190	543.68734	544.51287	545.38175	546.03042	546.63880	547.77920	548.67295
103	105	542.07632	541.11115	542.02338	542.98344	543.70015	544.37232	545.63218	546.61949
105	106	540.90038	539.88246	540.83604	541.83959	542.58875	543.29134	544.60818	545.64011
106	107	537.91513	536.76330	537.82184	538.93580	539.76734	540.54715	542.00865	543.15385
107	108	536.11170	534.83085	535.95639	537.14074	538.02475	538.85372	540.40720	541.62435
108	109	534.91342	533.54683	534.71689	535.94802	536.86690	537.72853	539.34312	540.60808
109	110	533.65542	532.19883	533.41563	534.69587	535.65135	536.54727	538.22602	539.54117
110	111	532.03146	530.45869	531.73582	533.07945	534.08218	535.02236	536.78394	538.16388
111	112	529.96454	528.24389	529.59781	531.02211	532.08499	533.08151	534.94851	536.41090
112	113	528.45655	526.62801	528.03796	529.52113	530.62788	531.66550	533.60941	535.13197
113	114	526.80068	524.85368	526.32514	527.87295	529.02789	530.11064	532.13900	533.72762

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta el resumen correspondiente a las presiones dinámicas y estáticas del caso número 3 analizado.

Tabla XVII. Dinámicas y estática del caso 3

Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
Línea de conducción										
0	0,5	74,14998	74,05743	74,07903	74,10180	74,11883	74,13483	74,16488	74,18851	105,56355
	1	68,52540	67,71419	67,76992	67,82869	67,87263	67,91390	67,99145	68,05239	100,27104
1	2	63,68412	62,82221	62,88978	62,96101	63,01429	63,06432	63,15832	63,23220	95,74324
2	3	59,94557	58,97889	59,07091	59,16793	59,24048	59,30863	59,43665	59,53727	92,65264
3	4	48,08376	46,98926	47,11042	47,23815	47,33367	47,42339	47,59193	47,72439	81,55520
4	5	43,30319	42,17688	42,30529	42,44066	42,54190	42,63698	42,81560	42,95599	76,96483
5	5,01	39,91776	38,77663	38,90842	39,04736	39,15125	39,24884	39,43216	39,57624	73,66803
5	6	3,74379	2,38669	2,54750	2,71704	2,84382	2,96290	3,18658	3,36239	38,16691
6	7	2,41757	1,04964	1,21292	1,38507	1,51379	1,63469	1,86181	2,04032	36,90548
7	6	-0,57456	-0,61457	-0,58494	-0,55379	-0,53057	-0,50881	-0,46810	-0,43625	0,26144
6	5	28,39667	27,88644	28,26432	28,66154	28,95772	29,23522	29,75454	30,16071	39,05935
5	5,1	23,95617	23,39120	23,80962	24,24944	24,57740	24,88466	25,45969	25,90942	35,76255
5	4	29,38888	28,70646	29,21187	29,74312	30,13926	30,51040	31,20497	31,74820	43,64973
4	3	30,62242	29,46798	30,32297	31,22168	31,89182	32,51967	33,69465	34,61362	54,74716
3	2	27,01210	25,53701	26,62948	27,77782	28,63409	29,43633	30,93769	32,11191	57,83776
2	1	28,29791	26,66768	27,87504	29,14416	30,09049	30,97710	32,63635	33,93407	62,36556
7	8	0,00593	-0,00114	0,00671	0,01498	0,02116	0,02696	0,03786	0,04641	0,23761
8	9	9,33889	9,29136	9,34413	9,39974	9,44130	9,48031	9,55356	9,61108	10,89678
9	10	17,94081	17,84748	17,95110	18,06028	18,14188	18,21848	18,36230	18,47524	20,99972
10	11	14,76364	14,63797	14,80342	14,97776	15,10806	15,23039	15,46003	15,64036	19,69752
11	12	15,56829	15,42016	15,62855	15,84815	16,01228	16,16637	16,45563	16,68277	21,80458
12	52	16,22674	16,02689	16,25547	16,49624	16,67613	16,84497	17,16178	17,41042	22,97511
52	53	26,06820	25,65375	25,96609	26,29472	26,54001	26,77002	27,20110	27,53893	34,94089
53	54	31,44710	30,86517	31,24288	31,64009	31,93642	32,21418	32,73445	33,14189	41,97793
54	55	36,53774	35,81458	36,24741	36,70244	37,04181	37,35983	37,95531	38,42145	48,46665
10	56	20,18741	20,05474	20,19457	20,34185	20,45188	20,55515	20,74892	20,90098	24,29236
56	57	29,97597	29,75133	29,97583	30,21219	30,38871	30,55431	30,86488	31,10843	36,52693
57	58	35,37215	35,10181	35,36837	35,64900	35,85856	36,05514	36,42374	36,71275	43,13847
58	59	33,86619	33,49977	33,85477	34,22845	34,50744	34,76914	35,25973	35,64429	44,18725
Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
59	61	29,56079	29,00323	29,54801	30,12127	30,54915	30,95038	31,70221	32,29117	45,39301
61	62	30,72775	30,03029	30,71396	31,43328	31,97011	32,47346	33,41647	34,15500	50,59310
62	63	28,21880	27,26397	28,20316	29,19120	29,92850	30,61972	31,91446	32,92820	55,50444
59	60	35,75418	35,29975	35,69592	36,11281	36,42399	36,71582	37,26273	37,69129	47,16016
12	13	14,53839	14,36136	14,61849	14,88944	15,09195	15,28207	15,63897	15,91919	22,24453
13	14	18,82827	17,16253	17,45149	17,75597	17,98355	18,19720	18,59827	18,91317	26,02450
14	15	16,38213	13,72243	14,06878	14,43376	14,70654	14,96264	15,44337	15,82081	24,34981
15	16	13,61661	10,91622	11,28931	11,68241	11,97618	12,25196	12,76959	13,17596	22,33236
16	37	14,91966	12,16355	12,56270	12,98315	13,29731	13,59216	14,14545	14,57967	24,32224
37	38	21,63599	18,76327	19,21696	19,69468	20,05148	20,38626	21,01417	21,50668	32,47606
15	43	17,05975	14,37541	14,76401	15,17347	15,47948	15,76674	16,30589	16,72912	26,29881
43	44	26,71788	23,97339	24,46517	24,98327	25,37040	25,73376	26,41558	26,95063	39,06169
44	45	31,53429	28,70433	29,34272	30,01517	30,51757	30,98907	31,87362	32,56755	48,28978
45	48	31,51329	28,49806	29,29516	30,13450	30,76136	31,34949	32,45236	33,31707	52,81669
48	49	29,24501	26,04525	27,00043	28,00597	28,75680	29,46108	30,78139	31,81620	55,07800
49	50	27,95295	24,52550	25,67573	26,88635	27,79014	28,63775	30,22635	31,47104	59,37494
50	51	20,88118	17,11187	18,55496	20,07350	21,20694	22,26976	24,26118	25,82099	60,69482
15	39	18,52805	18,33147	18,56253	18,80591	18,98776	19,15844	19,47872	19,73008	25,36166
39	40	33,64920	32,67804	32,99201	33,32244	33,56912	33,80049	34,23420	34,57417	42,07065
40	41	11,70854	11,95418	12,07315	12,19805	12,29108	12,37815	46,77512	12,66808	15,34402
41	42	33,71531	33,67230	33,92629	34,19292	34,39152	34,57742	69,15911	35,19636	40,90914
45	46	25,86696	22,64255	23,53323	24,47078	25,17081	25,82742	27,05830	28,02301	49,61309
45	47	25,31450	22,04284	22,85363	23,70693	24,34393	24,94136	26,06112	26,93864	46,44271
16	17	16,86969	14,10407	14,51469	14,94726	15,27049	15,57388	16,14324	16,59014	26,61693
17	18	12,31027	9,50586	9,93880	10,39485	10,73560	11,05541	11,65554	12,12655	22,67108
18	19	11,38558	8,55801	9,00172	9,46909	9,81828	10,14600	10,76093	11,24353	22,03215
19	20	13,25980	10,39036	10,85354	11,34138	11,70582	12,04784	12,68953	13,19308	24,42299

Continuación de la tabla XVII.

20	24	7,38189	4,46901	4,94793	5,45227	5,82902	6,18255	6,84577	7,36615	18,94045
24	25	11,94446	8,98918	9,48345	10,00392	10,39267	10,75744	11,44168	11,97848	23,88892
25	26	26,50027	35,62603	36,26215	36,93141	37,43091	37,89929	38,77705	39,46490	30,59804
26	27	22,35835	22,36200	22,55573	22,75895	22,91021	23,05172	62,09308	23,52233	27,77209
27	28	11,49010	11,00734	11,39092	11,79329	12,09277	12,37295	51,67332	13,30474	21,71904
28	29	19,48030	18,77633	19,24626	19,73919	20,10608	20,44932	59,86749	21,59085	31,89910
29	30	31,20663	30,31137	30,85596	31,42722	31,85240	32,25018	71,77021	33,57308	45,51920
25	31	2,28560	2,16055	2,20936	2,26056	2,29867	2,33432	2,40091	2,45289	27,91250
Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
31	32	3,97842	3,80680	3,87379	3,94405	3,99635	4,04528	4,13666	4,20799	30,06629
32	33	25,75900	25,36248	25,51725	25,67959	25,80043	25,91347	26,12462	26,28943	54,07336
33	34	32,43288	31,86299	32,08542	32,31875	32,49242	32,65489	32,95836	33,19522	62,46350
18	35	12,34453	9,48459	9,93490	10,40914	10,76341	11,09587	11,71958	12,20896	23,12010
35	36	20,47846	17,49229	17,98207	18,49767	18,88269	19,24388	19,92119	20,45236	32,19692
20	21	12,24812	9,20021	9,74334	10,31511	10,74209	11,14267	11,89387	12,48301	25,50538
21	22	15,61435	12,39445	13,04758	13,73496	14,24811	14,72940	15,63162	16,33883	31,91987
22	23	23,65095	20,28823	21,03271	21,81606	22,40077	22,94908	23,97669	24,78195	42,48756
7	64	0,00023	-0,01827	-0,01189	-0,00519	-0,00020	0,00446	0,01319	0,02000	0,15859
64	65	4,43996	4,40373	4,41623	4,42935	4,43911	4,44825	4,46533	4,47868	4,75004
65	67	7,21317	7,12046	7,17479	7,23188	7,27443	7,31429	7,38886	7,44717	8,70362
67	68	23,09367	22,62622	22,95808	23,30690	23,56698	23,81065	24,26663	24,62325	32,41525
68	69	29,91015	29,30173	29,73800	30,19656	30,53847	30,85880	31,45826	31,92709	42,17761
69	70	26,40023	21,97574	22,77710	23,61943	24,24750	24,83593	25,93713	26,79838	45,64623
70	71	6,49688	6,94313	6,96864	6,99544	7,01541	7,03411	7,06909	7,09644	7,67284
71	72	11,16239	11,56868	11,61316	11,65987	11,69469	11,72729	11,78828	11,83596	12,84080
72	73	24,87122	25,05813	25,26508	25,48258	25,64474	25,79666	26,08093	26,30325	31,13413
73	74	19,56630	19,57738	19,91456	20,26895	20,53319	20,78073	21,24398	21,60627	29,50384
74	75	20,94739	20,88414	21,27636	21,68861	21,99599	22,28395	22,82284	23,24429	32,43799
75	76	11,96503	32,11520	32,61293	33,13598	33,52594	33,89124	34,57478	35,10936	14,24857
65	66	10,04640	9,92835	9,95897	9,99101	10,01480	10,03701	10,07841	10,11064	10,73364
7	77	-0,55049	-0,55655	-0,55341	-0,55010	-0,54763	-0,54531	-0,54098	-0,53758	-0,46509
77	78	3,42612	3,39704	3,41214	3,42803	3,43988	3,45099	3,47182	3,48814	3,83616
78	79	9,72633	9,67534	9,70182	9,72967	9,75045	9,76993	9,80644	9,83505	10,44515
79	80	9,20625	9,13798	9,17343	9,21071	9,23853	9,26461	9,31349	9,35180	10,16859
80	82	19,39096	19,21089	19,37251	19,54265	19,66969	19,78888	20,01237	20,18763	24,06589
82	83	27,32167	27,09161	27,30964	27,53918	27,71060	27,87141	28,17298	28,40947	33,65664
83	85	26,92879	26,67447	26,89987	27,13715	27,31431	27,48051	27,79212	28,03644	33,43970
85	86	24,85604	24,53729	24,78228	25,04008	25,23252	25,41300	25,75127	26,01641	31,83422
86	87	24,12419	23,78269	24,03460	24,29965	24,49748	24,68300	25,03068	25,30316	31,26732
87	88	23,15274	22,78851	23,04733	23,31963	23,52285	23,71340	24,07050	24,35032	30,46081
88	89	21,19402	20,78280	21,05591	21,34318	21,55754	21,75851	22,13506	22,43005	28,84288
89	90	19,59656	19,15123	19,43470	19,73284	19,95529	20,16382	20,55448	20,86049	27,49276
90	91	17,94921	17,44054	17,74867	18,07267	18,31438	18,54094	18,96529	19,29762	26,47207
91	92	16,17756	15,61863	15,94632	16,29085	16,54785	16,78871	17,23980	17,59302	25,19777
92	93	12,64730	11,91437	12,30978	12,72537	13,03528	13,32567	13,86931	14,29483	23,38899
Est.	P.O.	Din (m)	Din (m) T (0 °C)	Din (m) T (5 °C)	Din (m) T (10 °C)	Din (m) T (15 °C)	Din(m) T (20 °C)	Din (m) T (30 °C)	Din (m) T (40 °C)	Estática (m)
93	94	11,83447	11,06242	11,47305	11,90463	12,22644	12,52796	13,09242	13,53420	22,96331
94	95	29,57537	28,60457	29,12446	29,67080	30,07812	30,45973	31,17395	31,73279	43,66557
95	96	27,08540	25,81078	26,49769	27,21947	27,75752	28,26154	29,20472	29,94250	45,70264
96	97	29,14448	27,58577	28,42885	29,31467	29,97496	30,59344	31,75070	32,65580	51,99466
80	81	35,04714	34,82987	34,89832	34,97006	35,02342	35,07332	35,16647	35,23916	36,69625
83	84	30,13485	29,59210	29,93218	30,28974	30,55645	30,80641	31,27448	31,64094	39,56531
83	98	35,26712	34,95806	35,23037	35,51701	35,73104	35,93182	36,30827	36,60344	43,12688
98	99	42,53648	42,05911	42,44707	42,85538	43,16022	43,44613	43,98213	44,40231	53,64508
99	100	42,15283	41,61046	42,04308	42,49837	42,83826	43,15705	43,75465	44,22310	54,51583
100	101	40,62956	39,98041	40,56391	41,17804	41,63653	42,06656	42,87268	43,50454	57,48764
101	102	38,96021	38,18224	38,94775	39,75348	40,35503	40,91926	41,97692	42,80589	61,24065
102	103	36,34824	35,49369	36,31922	37,18809	37,83676	38,44515	39,58555	40,47930	60,33597
103	105	34,41712	33,45196	34,36419	35,32425	36,04096	36,71312	37,97299	38,96030	60,87043

Continuación de la tabla XVII.

105	106	35,00436	33,98644	34,94002	35,94357	36,69273	37,39532	38,71217	39,74409	62,63361
106	107	29,53073	28,37890	29,43744	30,55140	31,38293	32,16275	33,62425	34,76945	60,14522
107	108	28,16168	26,88083	28,00637	29,19072	30,07473	30,90370	32,45718	33,67433	60,57960
108	109	28,26246	26,89588	28,06594	29,29707	30,21594	31,07757	32,69217	33,95712	61,87867
109	110	30,93358	29,47699	30,69379	31,97402	32,92951	33,82542	35,50418	36,81932	65,80778
110	111	26,73060	25,15783	26,43496	27,77859	28,78132	29,72150	31,48308	32,86301	63,22876
111	112	21,50174	19,78109	21,13501	22,55932	23,62220	24,61871	26,48571	27,94811	60,06683
112	113	20,07554	18,24700	19,65695	21,14012	22,24687	23,28449	25,22840	26,75096	60,14861
113	114	18,51105	16,56405	18,03551	19,58332	20,73826	21,82101	23,84937	25,43799	60,23999

Fuente: elaboración propia.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

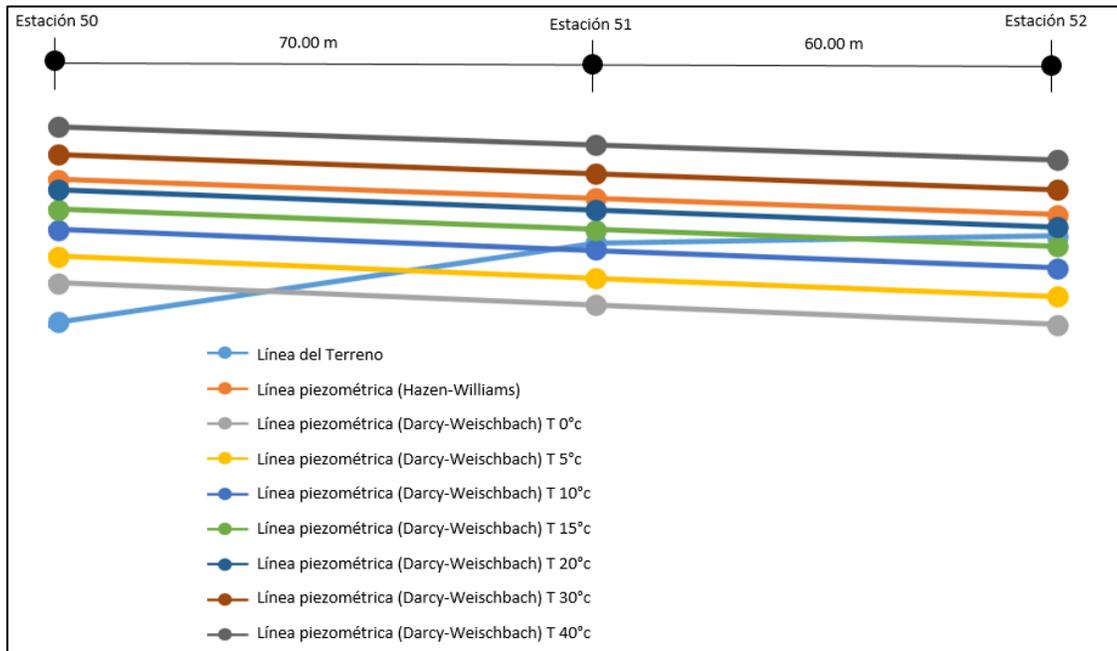
Tomando en consideración los datos vertidos en el capítulo 4 del presente trabajo investigativo, se procede a analizar los resultados obtenidos en relación con los diseños de abastecimiento de agua potable utilizando la ecuación de Hazen-Williams y su comparación con los datos de diseño obtenidos a través de la ecuación de Darcy-Weisbach para 7 temperaturas diferentes (0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 30 °C y 40 °C), en tres casos de estudio aplicados.

5.1. Variaciones en los valores de diseño

Un diseño de abastecimiento de agua potable en general, conlleva trasladar el agua potable desde una captación (superficial, subsuperficial o subterránea) hacia un tanque o reservorio y finalmente trasladarlo hacia la población beneficiaria. Lo importante es realizar este procedimiento con el menor costo posible. En términos generales un diseño de acueducto se basa en determinar diámetros, longitudes, velocidades y corroborar las presiones involucradas para garantizar que el vital líquido llegue con una presión dinámica adecuada, tomando en consideración el mínimo costo de construcción posible.

En los casos de estudio aplicados en este trabajo, se realizaron los cálculos pertinentes que se dispusieron en varias tablas en el capítulo cuatro. Debido a que los diámetros de análisis y de diseño no variaron para un mismo renglón (estación – punto observado), se procede a realizar el análisis de variación en función de las presiones dinámicas finales reflejadas en los casos de estudio mencionados.

Figura 12. Extracto de la línea piezométrica del caso 1



Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la figura 12 (la cual traza un perfil hidráulico de diseño), la línea piezométrica (que indica el máximo valor de presión dinámica en un punto de análisis) se entierra en la estación 51 del caso de estudio número 1, para los diseños realizados con la ecuación de Darcy-Weisbach para temperaturas de 0 °C, 5 °C y 10 °C.

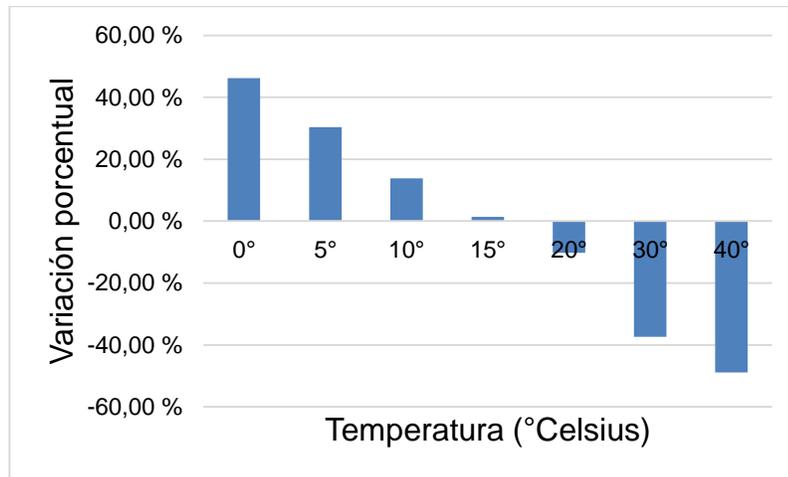
Cuando se indica que una cota piezométrica se entierra, se refiere a que la cota piezométrica es menor a la cota del terreno obtenida del levantamiento topográfico, tomando la presión dinámica valores menores a cero, indicando pues, que no hay presión en el flujo, de tal forma que el análisis del movimiento ya no se realizaría a través de las ecuaciones de la hidráulica de tuberías, sino más bien a través de la estática de fluidos. En términos generales, cuando la

cota piezométrica se entierra, no se está cumpliendo con los criterios básicos de diseño, por tanto, el diseño hidráulico tendría errores y muy posiblemente no se cumpliría con el objetivo primordial de un sistema de abastecimiento de agua potable, que es proveer de agua con presión adecuada a la población beneficiada.

En la misma figura 12 se puede identificar que para el diseño con la ecuación de Darcy-Weisbach con temperaturas de 20 °C, 30 °C y 40 °C, la cota piezométrica no se entierra. Esto muy probablemente se deba a que a mayores temperaturas, la viscosidad del agua tiende a disminuir; por tanto, las pérdidas por fricción son relativamente menores, generando a su vez mayores valores de presión dinámica.

La gráfica que se muestra a continuación representa la variación promedio entre las diferencias porcentuales de los valores de presión dinámica, utilizando la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach para siete diversas temperaturas.

Figura 13. **Variaciones porcentuales (diferencia de presiones dinámicas calculadas con Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para varias temperaturas)**



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la figura 13, se nota que hay variaciones sustanciales en los valores diferenciales entre las ecuaciones analizadas, siendo la temperatura que menos variación presenta, la de 15 °C. ¿A qué se debe esta variación? Seguramente, de acuerdo con el marco teórico referencial se explica que la ecuación de Hazen-Williams corresponde a una ecuación empírica validada para una temperatura de 60 °F que equivalen a 15,55 °C. Por ello es que la variación entre los cálculos con la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación más apegada a la realidad) y la de Hazen-Williams presenta valores en variación menores al 1,5 %.

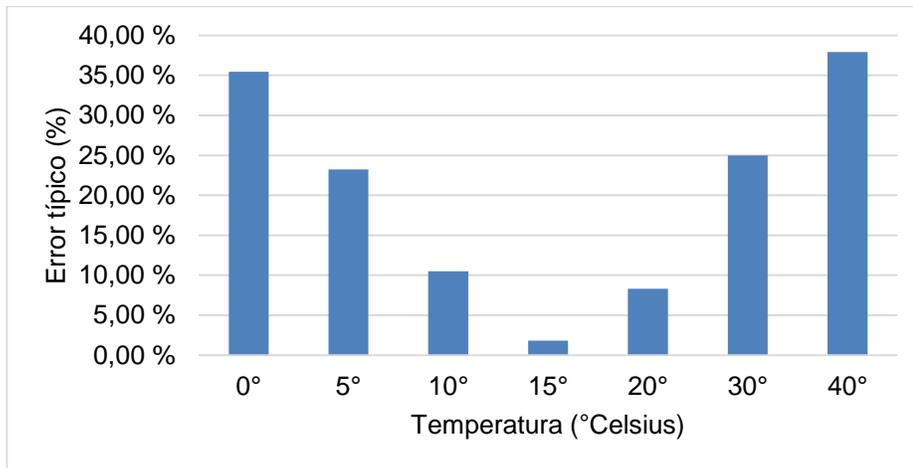
Es oportuno hacer hincapié en que la ecuación de Darcy-Weisbach es una ecuación ampliamente estudiada y se ajusta más a situaciones reales dado que contempla para su análisis más variables que están sujetas a cambios

dependiendo de los parámetros de diseño; a diferencia de la ecuación de Hazen-Williams que corresponde a una ecuación empírica de amplio uso en Guatemala y que la utilización de la misma generalmente se hace de forma indiscriminada, no tomando en cuenta sus limitantes para su aplicación.

De igual forma se observa en la figura 13 que a mayores temperaturas (valores de 20 °C o más) la variación porcentual es negativa, lo que significa que, al haber una mayor temperatura, los valores de las propiedades del agua se modifican; y en el caso específico de la viscosidad su valor tiende a disminuir, por consiguiente, hay menos pérdida por fricción y los valores de presión dinámica tienden a ser mayores.

De los cálculos realizados para los tres casos de estudio descritos en el capítulo 4 del presente trabajo, se analizaron las variaciones diferenciales entre las ecuaciones descritas, y se reflejan los siguientes valores de errores típicos en la estadística descriptiva, para diversas temperaturas.

Figura 14. **Errores típicos del análisis estadístico de las variaciones porcentuales en la aplicación de las ecuaciones de Hazen-Williams y Darcy-Weisbach para varias temperaturas**



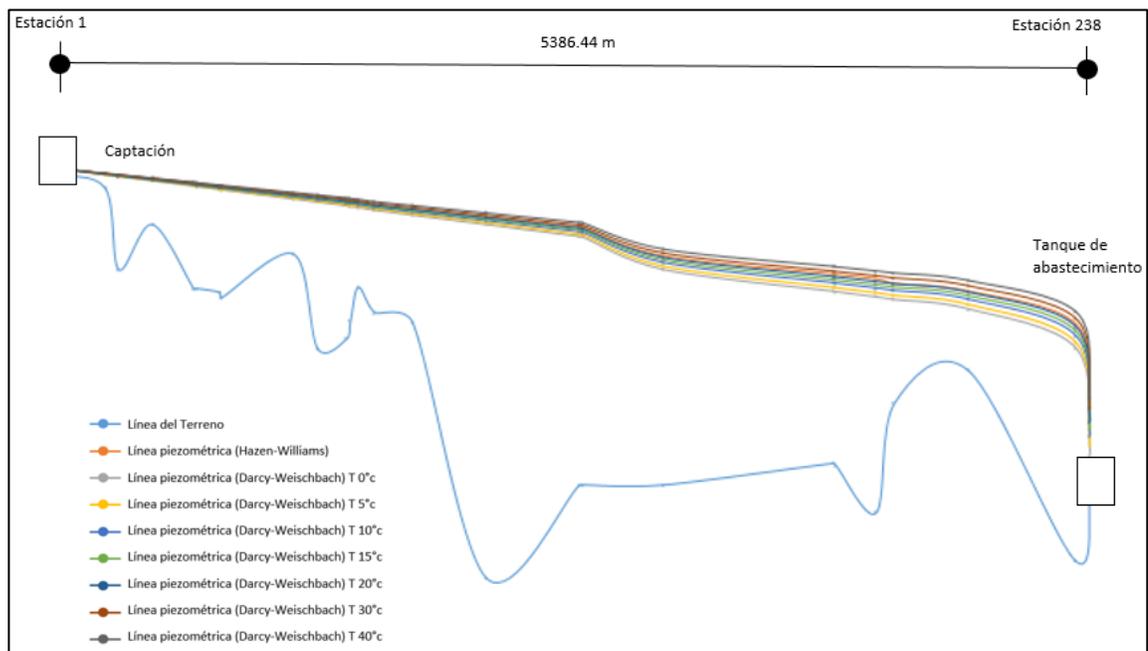
Fuente: elaboración propia.

Estas variaciones son importantes para tomar en consideración cuando se requiera elaborar un diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable, sin embargo, es más crítico cuando se quiere aplicar la ecuación de Hazen-Williams para temperaturas menores a 15 °C porque la probabilidad de que la presión dinámica sea igual o menor a cero es alta, lo que generaría problemas para conducir el agua hacia los beneficiarios, que corresponde al objetivo principal de un acueducto.

En la figura 14 se muestra que el error típico de acuerdo con la estadística descriptiva que se obtuvo a través del programa Microsoft Excel ®, muestra que la aplicabilidad de la ecuación de Hazen-Williams para valores cercanos a temperaturas de 15 °C presenta valores bajos, de tal forma que es más acertado el diseño para esta temperatura.

En algunos casos, podría ser despreciable la variación entre la aplicación o uso de una ecuación u otra para realizar un diseño, como se muestra a continuación.

Figura 15. Perfil y las líneas piezométricas del caso 2



Fuente: elaboración propia.

La figura 15 muestra el perfil hidráulico y las líneas piezométricas del caso de estudio número 2. Para este caso, en ningún punto del perfil se entierra la piezométrica, es decir, sin importar la temperatura, el agua llegará a su punto final previsto. Esto sucede ya que, en la mayoría de los tramos analizados para este caso, el diámetro de las tuberías utilizadas fue de 2 pulgadas; únicamente en las últimas estaciones se utilizaron diámetros menores a dicho diámetro.

Según el marco teórico referencial tomado del libro *Mecánica de fluidos* de Robert L. Mott, se indica que utilizar la ecuación de Hazen-Williams, se debe limitar “al flujo de aguas en tuberías con diámetros mayores a 2,0 pulgadas y menos de 6,0 pulgadas”³⁷.

5.2. Propuestas de diseño

Resulta importante, en virtud de lo esbozado en los acápites y subacápites anteriores en el presente trabajo, que se elaboren propuestas fundamentadas en la base teórica, respecto de los criterios de diseño que se deberían aplicar en el caso guatemalteco, toda vez es de amplio conocimiento que los diseñadores de sistemas de abastecimiento de agua potable utilizan indiscriminadamente la ecuación de Hazen-Williams.

Primero, de acuerdo con las fórmulas utilizadas para los sistemas de abastecimiento de agua potable, se deduce que la pérdida por fricción en las tuberías es proporcional al esfuerzo cortante que se produce dentro de las paredes de la tubería; es decir, que la pérdida por fricción depende a su vez de las propiedades del fluido que se transporta.

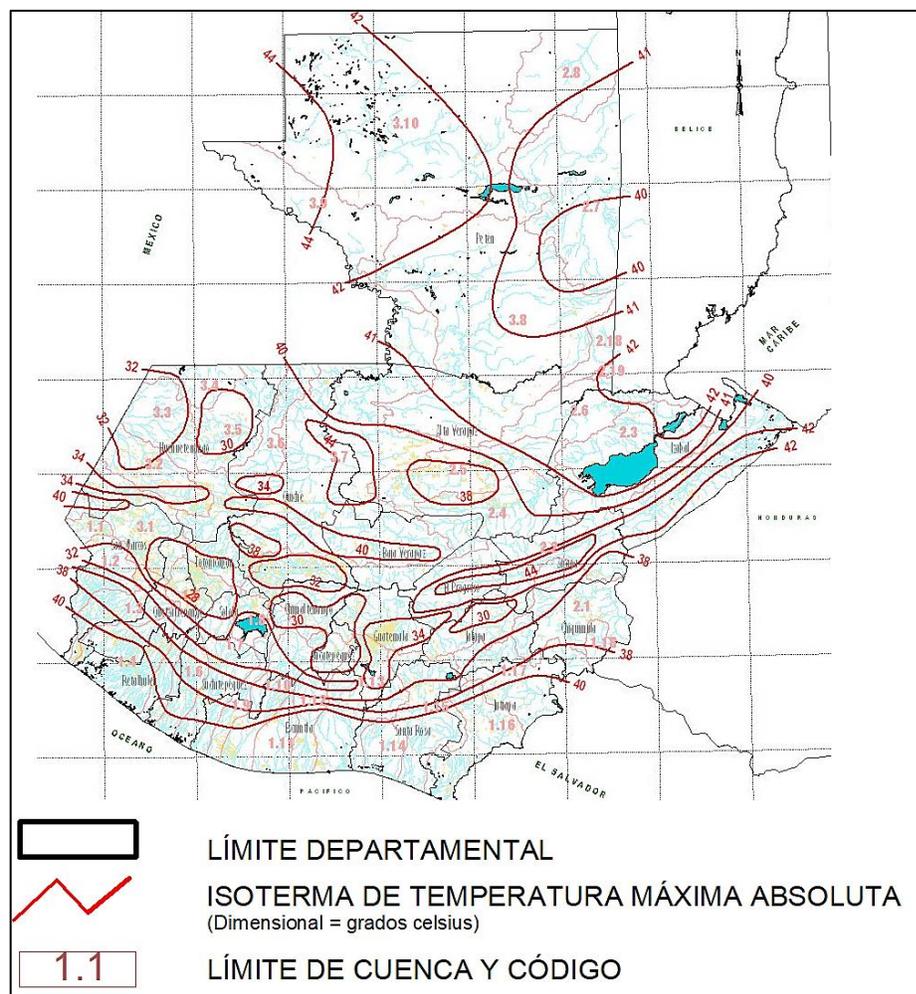
En el caso del agua potable, hay que tomar en consideración que la ecuación de Hazen-Williams se aplica con ciertas restricciones que en muchas ocasiones son ignoradas por los diseñadores. La ecuación de Darcy-Weisbach que se basa su diseño en métodos más aproximados debido a que contempla las propiedades del fluido a diferentes temperaturas.

Guatemala es un país con peculiaridades importantes en cuanto a sus características meteorológicas y climáticas se refiere. Variaciones extremas

³⁷ MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. p. 243.

(valores máximos y mínimos) pueden afectar la conducción de agua potable debido a que dependiendo de la temperatura de la misma, podría ocasionar mayor o menor pérdida de energía por fricción, y que esto a su vez podría ocasionar que la presión dinámica del fluido tienda a ser cero, lo que sería incorrecto desde la perspectiva del diseño hidráulico.

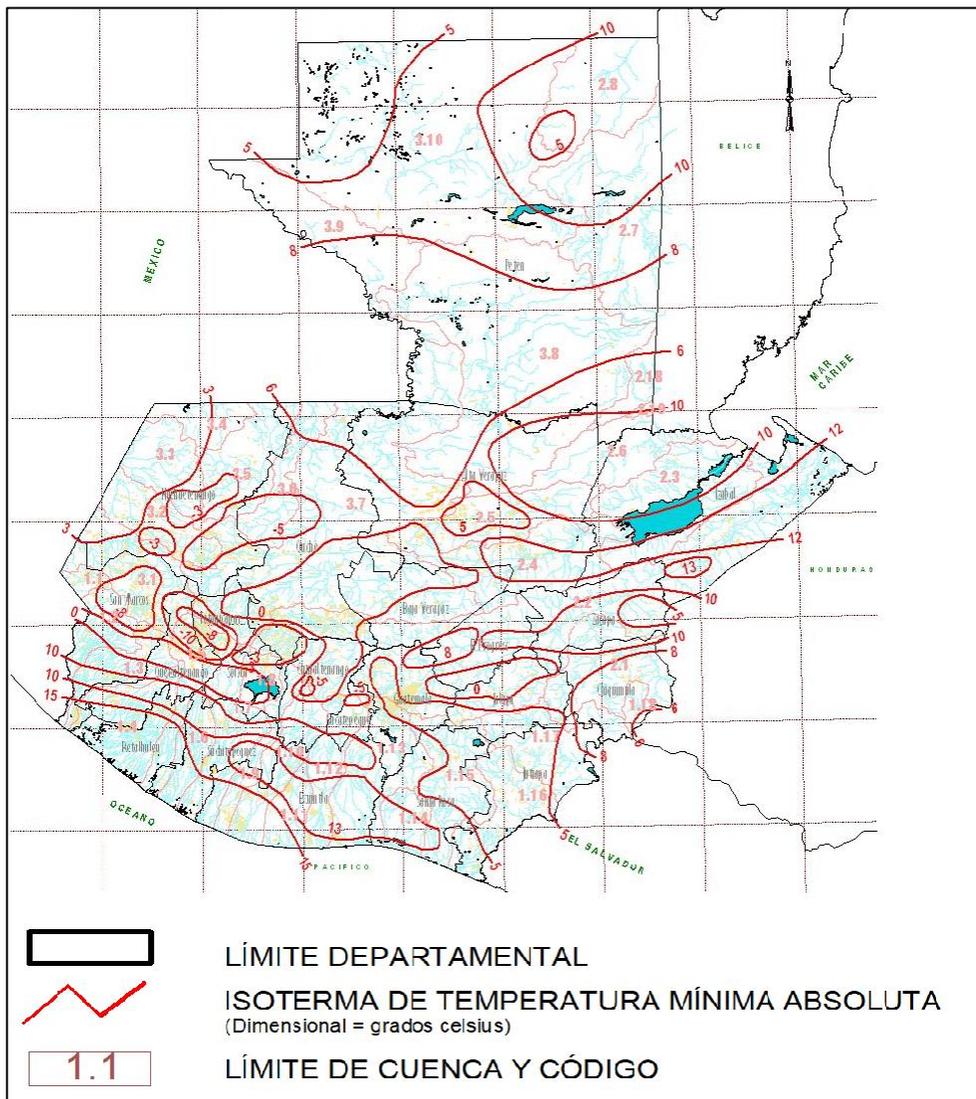
Figura 16. **Isoterma de temperatura máxima absoluta anual**



Fuente: INSIVUMEH. *Atlas climatológico*. http://www.insivumeh.gov.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico/t-mx-abs.jpg. Consulta: 26 de marzo de 2018.

Pueden notarse en las figuras 16 y 17 las variaciones anuales (en promedio) de los valores extremos (máximos y mínimos) de las temperaturas que se presentan dentro de la circunscripción del territorio guatemalteco.

Figura 17. **Isoterma de temperatura máxima absoluta anual**



Fuente: INSIVUMEH. *Atlas climatológico*. http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_Climatologico/t-mx-abs.jpg. Consulta: 26 de marzo de 2018.

Las variaciones en la temperatura son importantes a considerar en el diseño de acueductos para determinar los parámetros de diseño, y a su vez la utilización de las ecuaciones analizadas en esta investigación, Hazen-Williams o Darcy-Weisbach.

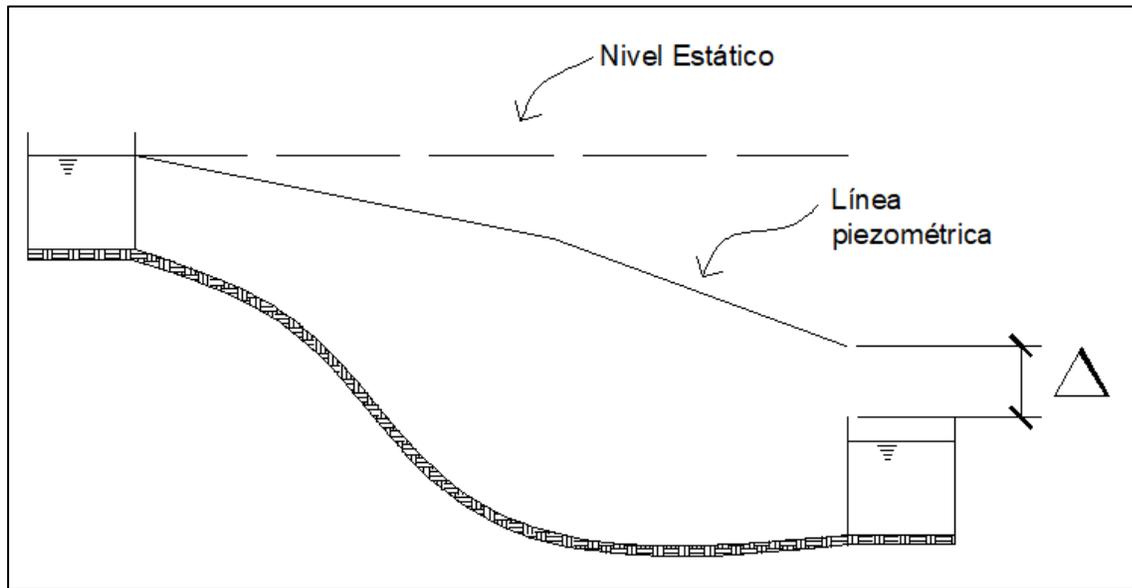
Debido a que las temperaturas anuales en el territorio guatemalteco, de acuerdo con las figuras 16 y 17, oscilan entre valores de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $44\text{ }^{\circ}\text{C}$, se proponen las siguientes consideraciones de diseño cuando se opte utilizar la ecuación de Hazen-Williams.

5.2.1. Factor de seguridad en la altura disponible

Si se diseña con la ecuación de Hazen-Williams para temperaturas menores a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, se debe compensar las pérdidas “ocultas”, que se originan cuando la viscosidad tiende a ser mayor y, por ende, mayores pérdidas por fricción, con las siguientes condiciones:

- Compensar las pérdidas no previstas utilizando un factor de seguridad asumiendo una cota mayor en el punto de llegada, para que ese diferencial altimétrico contrarreste las pérdidas de energía que no contempla la ecuación de Hazen-Williams.

Figura 18. Perfil de propuesta de diseño



Fuente: elaboración propia.

- Se puede asumir una distancia horizontal de diseño afectada por un multiplicador que sea mayor al factor de 1,03 a 1,05 por el cual se multiplica dicha distancia, para que este factor compense de cierta forma las pérdidas originadas por no considerar la temperatura *ad hoc* propuesta para la aplicación de la ecuación de Hazen-Williams.

CONCLUSIONES

1. Los criterios generales para diseños de acueductos o sistemas de abastecimiento de agua potable en Guatemala se refieren al levantamiento topográfico, determinación del periodo de diseño, estimación de la población de diseño (población futura), determinación de los factores de consumo, cálculo de caudales de diseño, verificación de presiones de diseño e indicar el tipo y clase de tubería a utilizar.
2. La ecuación de Darcy-Weisbach es la ecuación de resistencia fluida más general para el análisis de diseño para tuberías circulares que fluyen a sección llena (a presión); su uso contempla las variaciones climáticas dependiendo de la zona geográfica donde se realizará el diseño o construcción del acueducto.
3. La ecuación de Hazen-Williams se considera una fórmula empírica que presenta limitantes específicas en su uso, tales como la utilización exclusiva de agua para su cálculo; los diámetros de diseño preferiblemente deberían oscilar entre 2 hasta 72 pulgadas, la temperatura del agua debiese ser de 60 °F (aproximadamente 15,55 °C), de tal manera que su utilización indiscriminada para cualquier zona geográfica podría presentar errores en cálculos para los acueductos que se diseñen.
4. Luego de la aplicación de las ecuaciones de Hazen-Williams y la de Darcy-Weisbach con 7 temperaturas diferentes para tres diversos casos de estudio, se estableció que cuando la temperatura de diseño es menor

a 10 °C la ecuación de Hazen-Williams presenta variaciones con la de Darcy-Weisbach de más de 40 %, estableciéndose a la vez que hay puntos específicos de las líneas de conducción y/o distribución en los cuales la presión dinámica podría ser cero.

5. En Guatemala es común que los diseñadores apliquen la ecuación de Hazen-Williams para cualquier región sin importar la temperatura que prevalece en el área; por lo que para compensar las variaciones se estableció que se pueden compensar las pérdidas no previstas utilizando un factor de seguridad asumiendo una cota mayor en el punto de llegada, para que ese diferencial altimétrico contrarreste las pérdidas de energía que no contempla la ecuación de Hazen-Williams.

RECOMENDACIONES

1. Divulgar en la comunidad académica, específicamente para los cursos de Hidráulica e Ingeniería Sanitaria, que componen el pensum de estudios de la carrera de Ingeniería Civil, porque sienta las bases de diseño y las posibles incoherencias que podrían suscitarse al utilizar la ecuación de Hazen-Williams sin tomar en consideración la variación termal del agua que se transportará.
2. Para tener diseños más acertados, cobra importancia que los diseñadores indaguen las características y parámetros de diseño con el menor error posible. En este caso, se recomienda que para temperaturas menores a 10 °C y mayores a 20 °C se utilice la ecuación de Darcy-Weisbach para evitar variaciones sustanciales en el diseño final.
3. En un determinado momento, si un diseñador desea utilizar la ecuación de Hazen-Williams sin importar la temperatura, se debe asumir un factor de corrección altimétrico que permita compensar las pérdidas de energía que no se estarían tomando en consideración por la variación termal.

Al sector académico y científico en general, se recomienda ahondar en la línea de investigación relacionada con la aplicación metodológica seguida para el diseño de acueductos en general, y realizar pruebas *in situ* de los acueductos diseñados en época reciente y analizar las

posibles variaciones de diseño por el mal empleo de las ecuaciones de diseño.

BIBLIOGRAFÍA

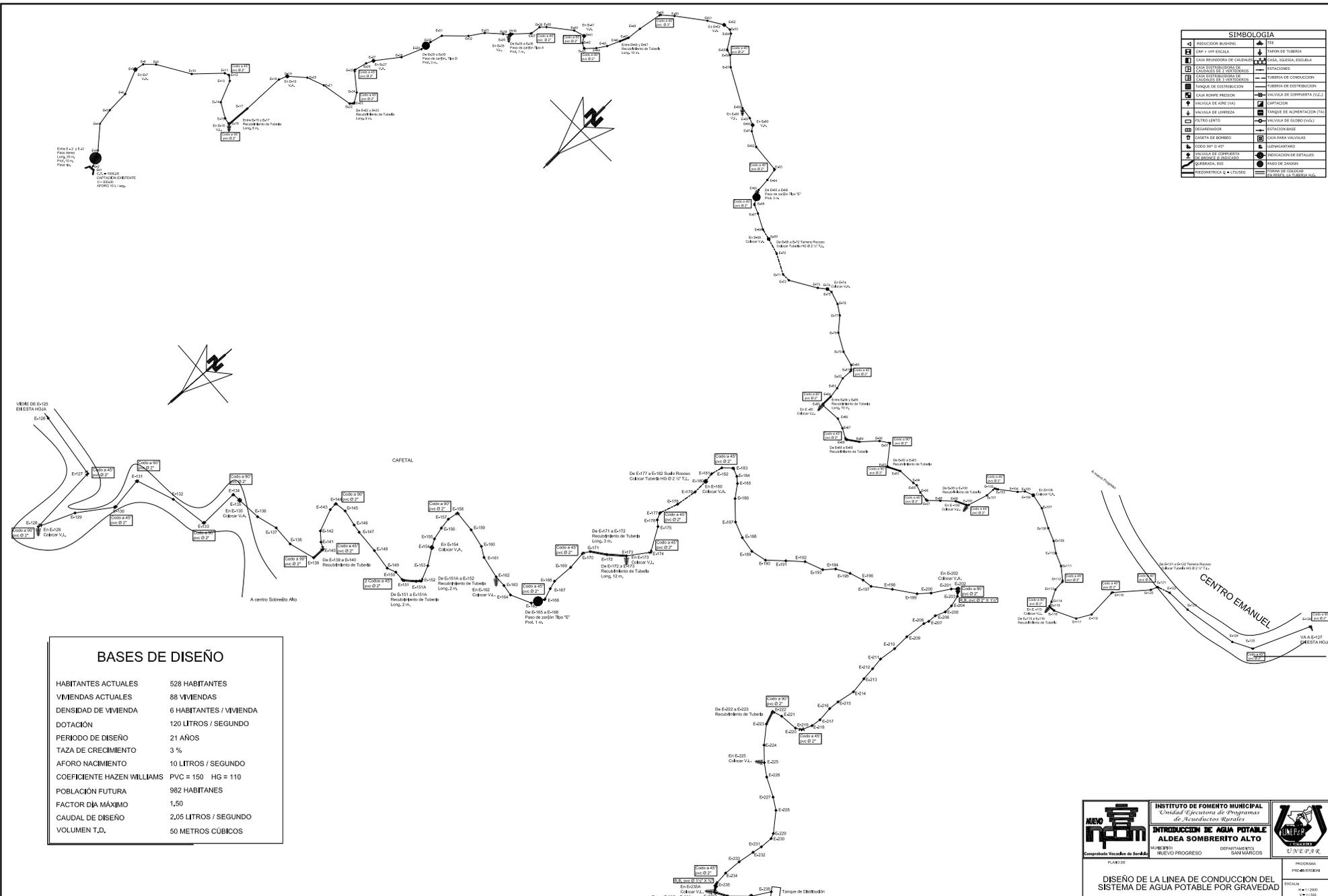
1. AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria*
1. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería.
Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 196 p.
2. AMANCO. *Manual técnico tubosistemas*. Argentina: AMANCO, 2013.
60 p.
3. Instituto de Fomento Municipal. *Guía de normas sanitarias para el
diseño de sistemas rurales de abastecimiento de agua para
consumo humano*. Guatemala: INFOM, 2011. 64 p.
4. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: Pearson, 2006.
647 p.
5. RODRÍGUEZ RUÍZ, Pedro. *Abastecimiento de agua*. México: Instituto
Tecnológico de Oaxaca, 2001. 466 p.
6. SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. Colombia: McGraw-Hill,
1998. 585 p.

APÉNDICE

Apéndice 1. **Planta-Perfil del diseño del sistema de abastecimiento de agua potable de la aldea Sombrerito Alto, Nuevo Progreso, San Marcos**

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2016.

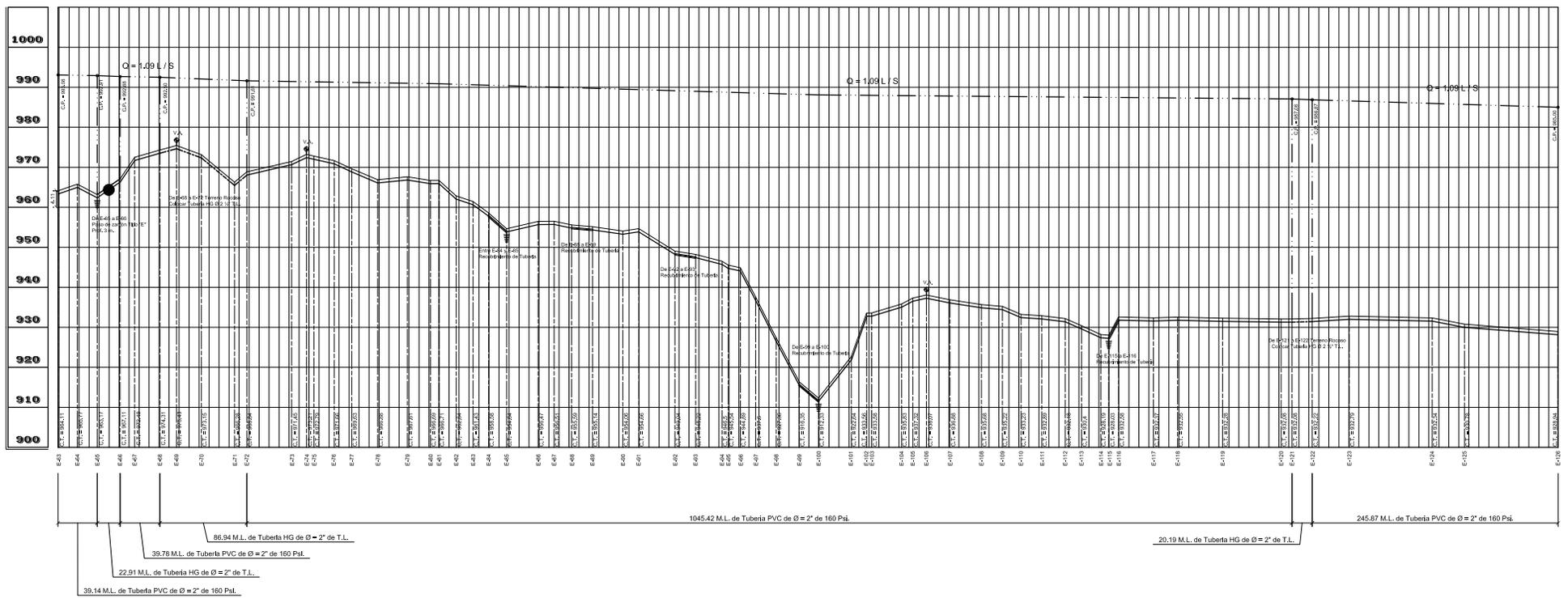
SIMBOLOGIA			
←	REDUCCION BORONA	+	100
⊠	CAJA VERIFICADA	⊠	TANQUE DE TUBERIA
⊠	CAJA REINFORZA DE CAJAL	⊠	CASA, IGLESIA, ESCUELA
⊠	CAJA DISTRIBUCION DE CAJAL	⊠	ESTACIONES
⊠	CAJA DISTRIBUCION DE CAJAL	⊠	TUBERIA DE CONDUCCION
⊠	TANQUE DE DISTRIBUCION	⊠	TUBERIA DE DISTRIBUCION
⊠	CAJA BOMBA FLECCION	⊠	TANQUE DE COMERCIO (V.C.)
⊠	VALVULA DE AIRE (VA)	⊠	COFECTOR
⊠	VALVULA DE LIBREZA	⊠	TANQUE DE ALIMENTACION (TA)
⊠	FILTRO LENTO	⊠	VALVULA DE GLOBO (V.G.)
⊠	REGISTRADOR	⊠	ESTACIONES
⊠	CAJETA DE FOMENTO	⊠	VALVULA MANUAL
⊠	COODO SOP O 45°	⊠	SEÑALIZADOR
⊠	VALVULA DE CORTAPU	⊠	INDICACION DE DETALLES
⊠	QUERACHA, BJD	⊠	OPERA DE CORTAPU
⊠	PIEZOMETRICA Q & VTS/VS	⊠	PASO DE ZANON
		⊠	OPERA DE CORTAPU
		⊠	VALVULA DE LIBREZA



BASES DE DISEÑO	
HABITANTES ACTUALES	528 HABITANTES
VIVIENDAS ACTUALES	88 VIVIENDAS
DENSIDAD DE VIVIENDA	6 HABITANTES / VIVIENDA
DOTACION	120 LITROS / SEGUNDO
PERIODO DE DISEÑO	21 AÑOS
TAZA DE CRECIMIENTO	3 %
AFORO NACIMIENTO	10 LITROS / SEGUNDO
COEFICIENTE HAZEN WILLIAMS	PVC = 150 HG = 110
POBLACION FUTURA	982 HABITANTES
FACTOR DIA MÁXIMO	1,50
CAUDAL DE DISEÑO	2,05 LITROS / SEGUNDO
VOLUMEN T.D.	50 METROS CÚBICOS

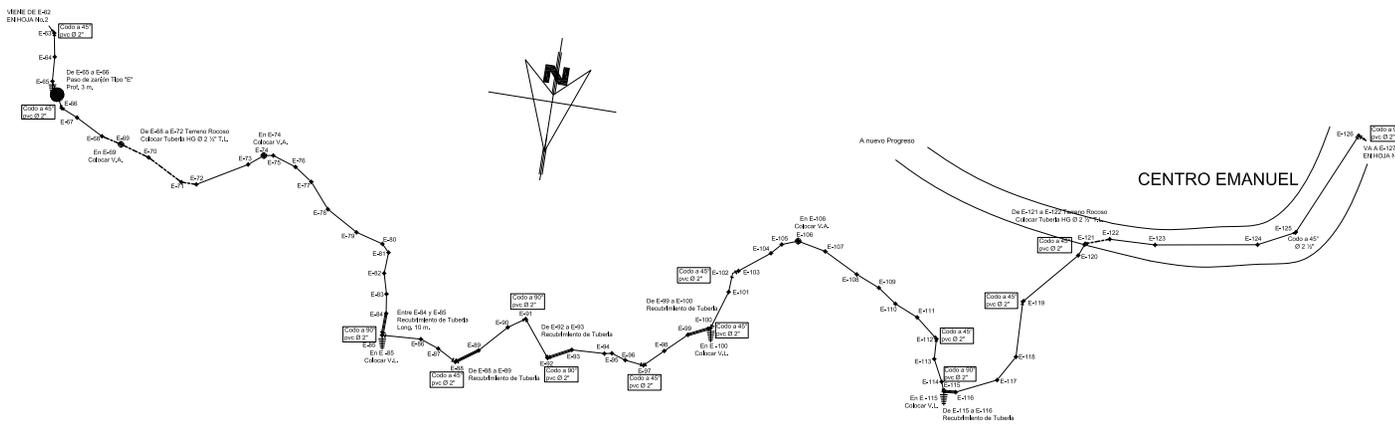
PLANTA DE CONJUNTO LÍNEA DE CONDUCCIÓN
 ESCALA: 1 / 2500

	INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL Unidad Ejecutora de Programas de Acueductos Rurales	
	INTRODUCCION DE AGUA POTABLE ALDEA SOMBRERITO ALTO DEPARTAMENTO: NUEVO PROGRESO DEPARTAMENTO: SAN MARCELOS	
PLANO DE:	DISEÑO DE LA LINEA DE CONDUCCION DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE POR GRAVEDAD	PROGRAMAS: FOM-ACUEDUCTO
LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO: JOSE MALLARINO	CALCULO TOPOGRAFICO: JOSE MALLARINO	ESCALA: 1/4 1:2000 V=4 1:1000
DISEÑO TOPOGRAFICO: ROBALBO JOSE MALLARINO	DISEÑO ROBALBO: M.D. VICTOR BOTO	FECHA: MARZO 2010
COORDINADOR DE UNIDAD DE DISEÑO: M.D. JUAN MARGARITON	DIRECTOR EJECUTIVO DEL PROGRAMA FOM-ACUEDUCTO: ING. JUAN GOMEZ	1 / 8



PERFIL DE E-63 A E-126

ESCALA VER : 1 / 500
ESCALA HOR : 1 / 2000



PLANTA DE E-63 A E-126

ESCALA : 1 / 2000

SIMBOLOGIA	
REDECION BOMBEO	TE
EXP + VVF ESCALA	TAPON DE TUBERIA
CASA REINTEGRADA DE CALIBRE	CASA ESCUELA ESCUELA
CASA REINTEGRADA DE CALIBRE	ESTACIONES
CASA REINTEGRADA DE CALIBRE	TRINCHERA DE CONDUCCION
TANQUE DE DISTRIBUCION	TUBERIA DE DISTRIBUCION
CASA BOMBEO RESERVA	VALVULA DE COMPRESION (V.C.)
VALVULA DE AIRE (VA)	CAPTACION
VALVULA DE LIMPIEZA	TANQUE DE ALIMENTACION (TA)
RETENEDOR	VALVULA DE CIERRE (V.C.)
PERFORADOR	ESTACION BASE
CASITA DE BOMBEO	CASA PARA VALVULAS
CODO 90° Ø 2"	LEVANTAMIENTO
INDICADOR DE CUBIERTA	INDICACION DE DETALLES
QUIMICA	INDICADOR DE TUBERIA
PIEZOMETRICA Ø 2.5" S/SG	PISTA DE COLOCACION DE TUBERIA S/SG

INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL
Unidad Ejecutora de Programas de Acueductos Rurales

INTRODUCCION DE AGUA POTABLE ALDEA SOMBRERITO ALTO

INICIADORES: NUEVO PROGRESO DEPARTAMENTALES, SAN MARCELOS

PLANO DE DISEÑO DE LA LINEA DE CONDUCCION DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE POR GRAVEDAD

LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO: JOSE BLATTNER
CALCULO TOPOGRAFICO: JOSE BLATTNER
DISEÑO TOPOGRAFICO: ROBALBAICO
DISEÑO ROBALBAICO
COORDINADOR DE UNIDAD DE DISEÑO: ING. OTTO MARGARETH
DIRECTOR EJECUTIVO DEL PROGRAMA PREINVERSIÓN: ING. JUAN JOSE

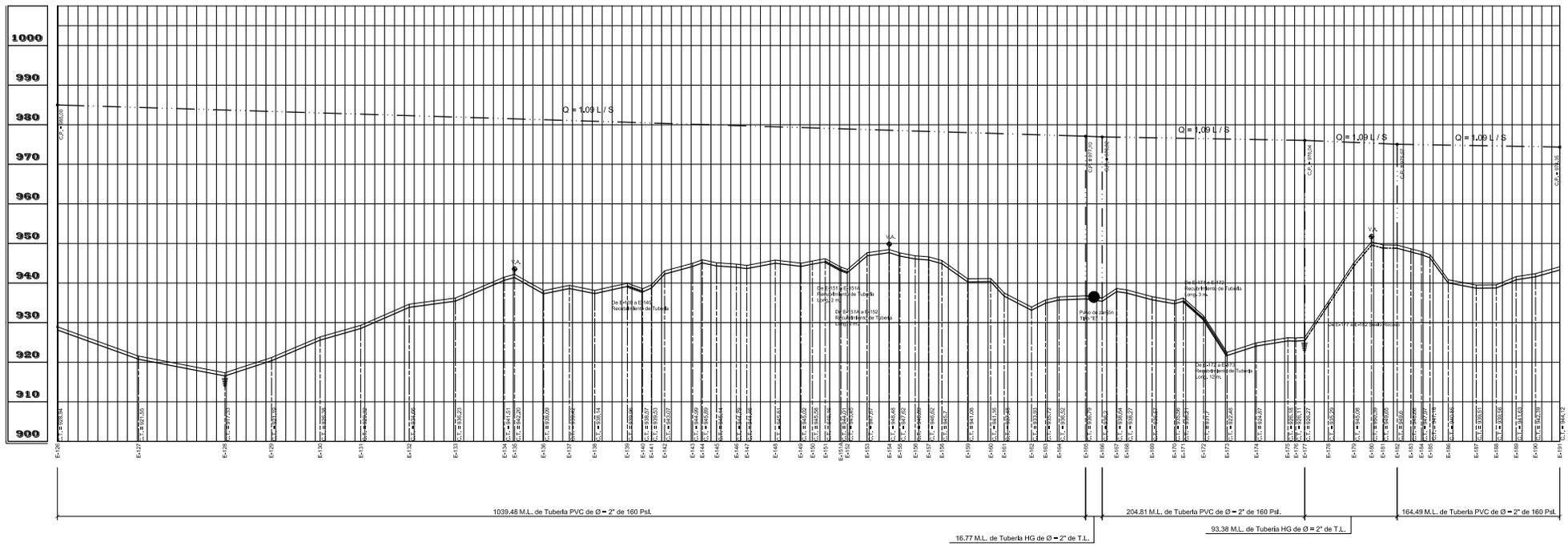
PROGRAMA: PRE-ALCANTARILLADO

ESCALA: 1:1000
V:1/1000

FECHA: MARZO 2010

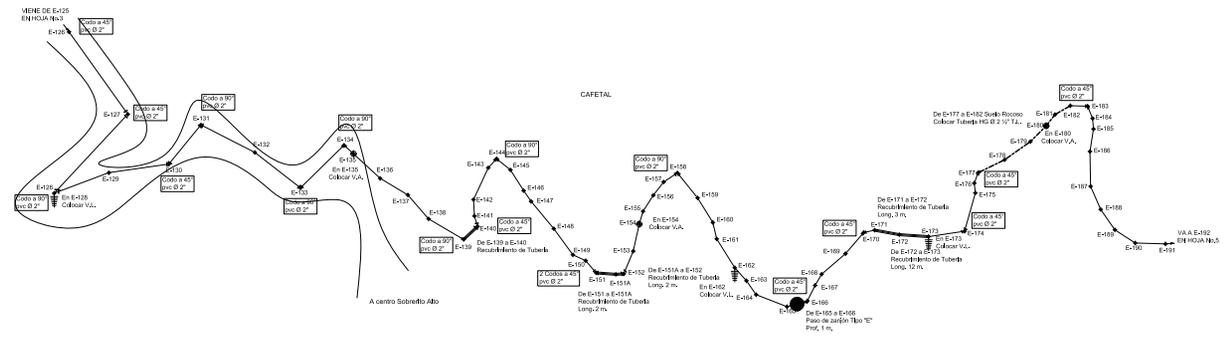
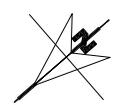
3

8



PERFIL DE E-126 A E-191

ESCALA VER: 1 / 500
ESCALA HOR: 1 / 2000



PLANTA DE E-126 A E-191

ESCALA: 1 / 2000

SIMBOLOGIA	
REDECORACION BARRERA	TE
EXP + VVF ESCALA	TAPON DE TUBERIA
CASA REINTEGRADA DE CALDERAS	CASA ESCUELA ESCUELA
CASA REINTEGRADA DE CALDERAS DE 3 UNIDADES	ESTACIONES
CASA REINTEGRADA DE CALDERAS DE 2 UNIDADES	TIENDA DE CONEXIONES
TANQUE DE DISTRIBUCION	TUBERIA DE DISTRIBUCION
CASA BOMBEADOR	VALVULA DE COMPRESION (V.C.)
VALVULA DE AIRE (VA)	CAPTACION
VALVULA DE LIMPIEZA	VALVULA DE ALIMENTACION (VA)
RETENEDOR	VALVULA DE CIERRE (V.C.)
DESARMADOR	FACTORIZACION
CASERA DE BOMBEO	CASA PARA VALVULAS
CODIGO SP 45P	ELERANTAMIENTO
INDICADOR DE CUBIERTA	INDICACION DE DETALLES
INDICACION DE BARRIDO	INDICACION DE BARRIDO
INDICACION DE BARRIDO	INDICACION DE BARRIDO
INDICACION DE BARRIDO	INDICACION DE BARRIDO
INDICACION DE BARRIDO	INDICACION DE BARRIDO

INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL
Unidad Ejecutora de Programas de Acueductos Rurales

INTRODUCCION DE AGUA POTABLE ALDEA SOMBRERITO ALTO

DEPARTAMENTO: NUEVO PROGRESO
MUNICIPIO: SUMAMARQUES

PROGRAMA: FOMENTO RURAL

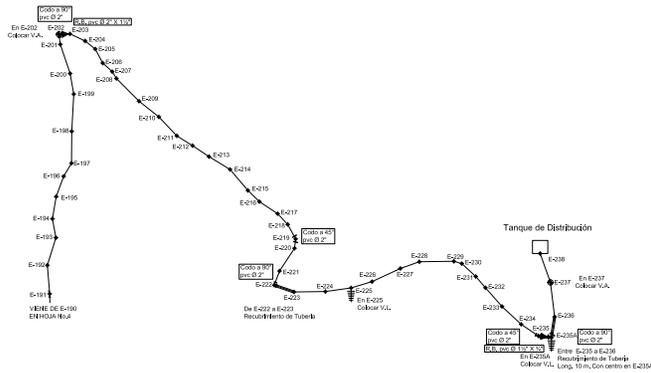
ESCALA: 1/2000

FECHA: MARZO 2010

<p>PLANO DE DISEÑO DE LA LINEA DE CONDUCCION DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE POR GRAVEDAD</p>	
LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO: JOSE VILLATORO	CALCULO TOPOGRAFICO: JOSE VILLATORO
DISEÑO TOPOGRAFICO: ROBALIC JOSE VILLATORO	DISEÑO ROBALIC: ING. VICTOR BOTO
COORDINADOR DE UNIDAD DE DISEÑO: ING. OTTO MARGARETH	DIRECTOR EJECUTIVO DEL PROGRAMA PREINVERSIÓN: ING. JOAQUIN GOMEZ

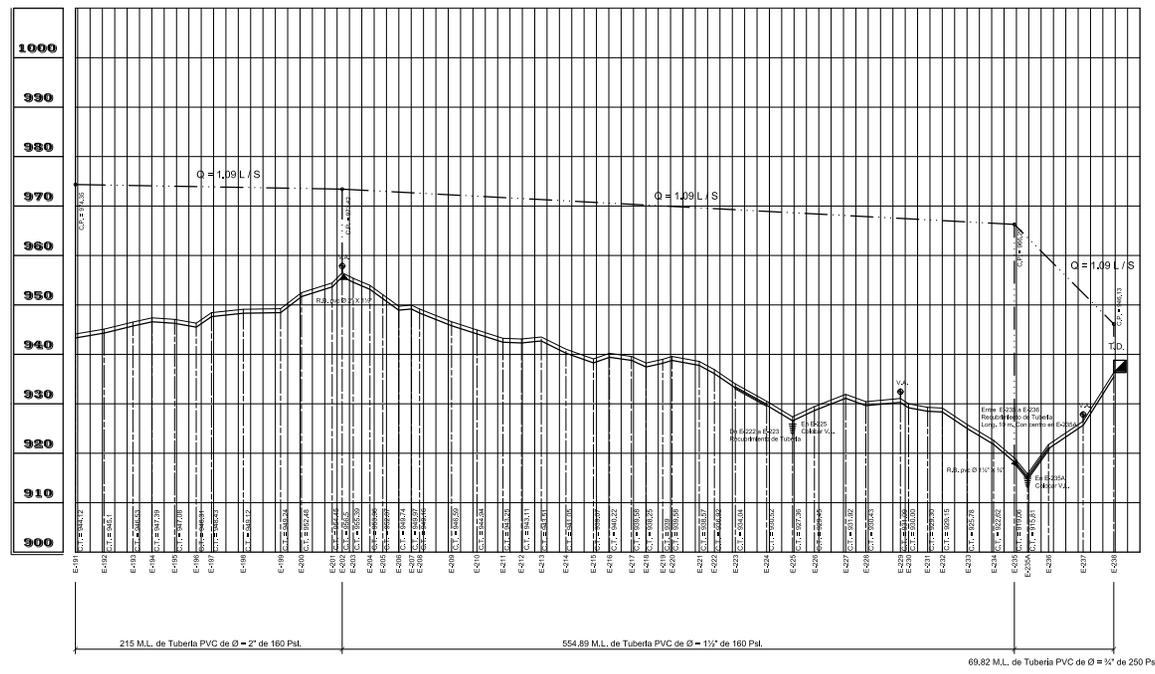
4

8



PLANTA DE E-191 A E-238

ESCALA: 1 / 2000



PERFIL DE E-191 A E-238

ESCALA VER: 1 / 500
ESCALA HOR: 1 / 2000

SIMBOLOGIA	
REDECCION BOMBEO	TET
EXP - VVF ESCALA	TAPON DE TUBERIA
CASA REINFORZADA DE CALERA	CASA, ESCUELA, ESCUELA
CASA REINFORZADA DE CALERA	ESTACIONES
CASA REINFORZADA DE CALERA	TUBERIA DE CONDUCCION
TANQUE DE DISTRIBUCION	TUBERIA DE DISTRIBUCION
CASA BOMBA FRESOR	VALVULA DE COMPUESTA (V.C.)
VALVULA DE AIRE (VA)	CAPIFACION
VALVULA DE LIMPIEZA	TANQUE DE ALICATACION (TA)
FILTRO LENTO	VALVULA DE CIERRE (V.C.)
DESAMBIADOR	CAPIFACION BASE
CASITA DE BOMBEO	CASA PARA VALVULAS
CODIGO SP 45P	ALICATAMIENTO
VALVULA DE COMPUESTA	INDICACION DE DETALLES
QUIMICA (Q)	PAVIMENTO
PIEZOMETRICA Q & L/S (L/S)	PISTA DE COLOCACION
	TUBERIA (V. LIBRE) (V.L.)

INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL
Unidad Ejecutora de Programas de Acueductos Rurales

INTRODUCCION DE AGUA POTABLE ALDEA SOMBRERITO ALTO

MUNICIPIO: NUEVO PROGRESO DEPARTAMENTO: SAN MARCOS

PLANO DE: PROYECTO: FNE-MUE-05004

INSTITUTO DE FOMENTO MUNICIPAL
Unidad Ejecutora de Programas de Acueductos Rurales

INTRODUCCION DE AGUA POTABLE ALDEA SOMBRERITO ALTO

MUNICIPIO: NUEVO PROGRESO DEPARTAMENTO: SAN MARCOS

PLANO DE: PROYECTO: FNE-MUE-05004

DISEÑO DE LA LINEA DE CONDUCCION DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE POR GRAVEDAD

ESCALA: 1/4" = 1'000
V=1:500

FECHA: MARZO 2010

LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO: JOSE MULLATERO	CALCULO TOPOGRAFICO: JOSE MULLATERO
DEBIDO TOPOGRAFICO: MORALES JOSE MULLATERO	DEBIDO MORALES: M.V. VICTOR BOTO
COORDINADOR DE UNIDAD DE DISEÑO: ING. OTTO MARGARETH	DIRECTOR EJECUTIVO DEL PROGRAMA PRIORITARIO: ING. JUAN GOMEZ

5

8