

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO DE
CONDUCCIONES EN RELIEVE ACCIDENTADO**

POR:

M.I. RODRIGO RUIZ SANTOS

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA

**DIRECTOR DE TESIS
Dr. Humberto Silva Hidalgo**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

MAYO 2026



"A

"Metodología para el Análisis Hidráulico de Conducciones en Relieve Accidentado". Tesis, presentada por Rodrigo Ruiz Santos como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería

M.I. Rodrigo de la Garza Aguilar
Secretario de Investigación y Posgrado

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Coordinador Académico

Dr. Humberto Silva Hidalgo
Director de Tesis

MAYO 2026
Fecha

COMITÉ

Dr. Humberto Silva Hidalgo
Dr. Jorge Lucero Álvarez
Dr. María Socorro Espino Valdez
Dr. Cornelio Álvarez Herrera
Dr. Adán Pinales Munguía



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

25 de mayo de 2026.

M.I. RODRIGO RUIZ SANTOS

Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Humberto Silva Hidalgo** para que lo desarrolle como tesis, con el título **"METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS HIDRÁULICO DE CONDUCCIONES EN RELIEVE ACCIDENTADO"**.

Índice de Contenido

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

Resumen

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del Problema

1.2 Revisión Bibliográfica

1.3 Justificación

1.4 Objetivo General

1.4.1 Objetivos Específicos:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Ecuaciones de Gobierno

2.1.1 Ecuaciones de flujo en lámina libre 1D

2.1.2 Ecuaciones de flujo a presión en 1D

2.1.3 Ecuaciones de la onda Cinemática en 1D

2.2 Modelos Matemáticos

2.2.1 Modelo de Columna Rígida

2.2.2 Modelo Elástico

2.2.3 Modelo 2D/3D

2.3 Fundamentos teóricos del diseño de líneas de conducción de agua potable a gravedad

3. FENÓMENOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

3.1 Llenado en líneas de Conducción.

3.2 Flujo Mixto

3.3 Aire Atrapado en Sistemas de Conducción

3.3.1 Efecto de las Bolsas de Aire en Conducciones

3.3.2 Revisión del efecto de aire arrastrado



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

4. MODELO EXPERIMENTAL

4.1 Geometría del Experimento

4.2 Construcción del Modelo

1.1 Instrumentación

4.4 Calibración del Modelo

4.2.1 Nivelación del Modelo Experimental

4.5 Determinación de los Coeficientes de Pérdidas por Fricción y Pérdidas Locales en los accesorios del modelo.

4.5.1 Conexión de Tanque a Tubería

4.5.2 Conexión de Tanque a Válvula Globo

4.5.2 Conexión de Tanque a Tubería (1.8 m)

4.5.3 Conexión de Tanque-Tubería y Angulo de 90°

4.5.4 Conexión de Tanque-Tubería y Angulo de 45°

4.5.5 Conexión de Tanque-Tubería y TEE

4.6 Resumen de las pérdidas Locales calculadas en el modelo

5. SIMULACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

5.1 Simulación en EPANET

5.2 Pruebas Experimentales de Gasto y Velocidades en el Modelo Físico

5.3 Resultados del Cálculo de la Simulación Matemática en EPANET

5.4 Simulación en Storm Water Management Model (SWMM)

5.4.1 Onda Dinámica



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 5.5 Resultados del Cálculo de la Simulación Matemática en SWMM
- 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES EN EPANET y SWMM
 - 6.1 EPANET
 - 6.2 SWMM
 - 6.3 Propuesta metodológica para el análisis de conducciones a gravedad en relieve accidentado
- 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- 8 Bibliografía
- 9 Curriculum

ATENTAMENTE

"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ
MARTÍNEZ**

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



DIRECCIÓN

**SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO**

M.I. RODRIGO DE LA GARZA AGUILAR

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a todas las personas que han sido fundamentales tanto en mi trayectoria académica como en la realización de esta tesis.

A mis Padres, por su amor incondicional y su constante apoyo a lo largo de los años. Su aliento y comprensión han sido la fuente de mi fortaleza.

A mis amigos y colegas, quienes compartieron conmigo los desafíos y los triunfos. Sus aportes y perspectivas enriquecieron mi experiencia académica y me motivaron a seguir adelante.

Finalmente, dedico este trabajo a todos aquellos que, de una manera u otra, han contribuido a mi crecimiento académico y personal. Este logro es tanto suyo como mío

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi Padre Ramiro Ruiz Rangel y mi Madre Manuela Santos Rodríguez, cuya orientación, paciencia y dedicación fueron fundamentales en cada etapa de este proyecto. Su sabiduría y apoyo me guiaron a lo largo de los desafíos y me inspiraron a alcanzar estándares más altos.

Mi gratitud se extiende a mi familia y principalmente a mi Esposa Olga Alicia Márquez Franco por su constante aliento y comprensión. Su apoyo incondicional me brindó la fortaleza necesaria para superar momentos difíciles y perseverar en la búsqueda del conocimiento.

Finalmente, dedico este logro a aquellos que, de una manera u otra, contribuyeron y entorpecieron a mi crecimiento personal y académico. Este trabajo es un reflejo de la colaboración, perseverancia y el esfuerzo colectivo de muchos, y estoy agradecido por cada aportación.

Gracias a todos los que formaron parte de este viaje académico. Su apoyo y sus contribuciones han dejado una marca indeleble en esta investigación.

RODRIGO RUIZ SANTOS

Resumen

El análisis hidráulico de conducciones a gravedad en relieve accidentado representa un problema técnico complejo, debido a que el supuesto convencional de operación a tubo completamente lleno no siempre reproduce el comportamiento real del flujo. En este tipo de sistemas pueden presentarse cambios de pendiente, puntos altos, acumulación de aire, pérdidas locales significativas y transiciones entre flujo a presión y flujo parcialmente lleno, lo que modifica la relación entre la carga hidráulica disponible, el gasto conducido y la línea piezométrica del sistema.

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar una metodología para el análisis hidráulico aproximado de conducciones en relieve accidentado, considerando distintas condiciones de operación y la influencia de las pérdidas hidráulicas. Para ello, se diseñó, construyó e instrumentó un modelo físico experimental en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua. El modelo permitió representar una conducción con perfil longitudinal irregular, tubería transparente, accesorios hidráulicos, válvulas de control, piezómetros, manómetro y medición de gasto mediante rotámetro y aforo volumétrico.

Como parte del trabajo experimental, se determinaron los coeficientes de pérdida por fricción y pérdidas locales en la tubería y accesorios del modelo físico, evaluando su comportamiento bajo distintos gastos de operación. Posteriormente, estos parámetros fueron incorporados en simulaciones hidráulicas realizadas en EPANET y SWMM, con el propósito de comparar los resultados numéricos con las mediciones experimentales de gasto, velocidad y carga piezométrica.

Los resultados muestran que EPANET permite representar de manera adecuada el comportamiento del sistema bajo la hipótesis de flujo presurizado y tubo lleno, especialmente en términos de gasto y velocidad; sin embargo, presenta limitaciones para reproducir la línea piezométrica observada cuando existen condiciones asociadas a flujo parcialmente lleno, flujo mixto o presencia de aire. Por su parte, SWMM, mediante el esquema de onda dinámica,

mostró una mejor aproximación al comportamiento piezométrico medido en el modelo experimental, por lo que constituye una herramienta complementaria para el análisis de conducciones a gravedad en geometrías irregulares.

Con base en los resultados obtenidos, se propone una metodología de análisis que integra la caracterización geométrica de la conducción, la identificación de puntos críticos, la determinación de pérdidas hidráulicas, la simulación numérica y la comparación con mediciones experimentales o de campo. Esta metodología permite evaluar con mayor criterio la capacidad hidráulica real de conducciones a gravedad en relieve accidentado y orientar decisiones de diseño, operación y ubicación de dispositivos de control de aire.

Palabras clave: conducciones a gravedad, relieve accidentado, aire atrapado, pérdidas hidráulicas, modelo experimental, EPANET, SWMM, línea piezométrica.



ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
Resumen	6
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 Descripción del Problema	14
1.2 Revisión Bibliográfica	16
1.3 Justificación	21
1.4 Objetivo General	22
1.4.1 Objetivos Específicos:	22
2. MARCO TEÓRICO	23
2.1 Ecuaciones de Gobierno	23
2.1.1 Ecuaciones de flujo en lámina libre 1D	26
2.1.2 Ecuaciones de flujo a presión en 1D	27
2.1.3 Ecuaciones de la onda Cinemática en 1D	30
2.2 Modelos Matemáticos	31
2.2.1 Modelo de Columna Rígida	36
2.2.2 Modelo Elástico	36
2.2.3 Modelo 2D/3D	37
2.3 Fundamentos teóricos del diseño de líneas de conducción de agua potable a gravedad	37
3. FENÓMENOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN	40
3.1 Llenado en líneas de Conducción	40
3.2 Flujo Mixto	41
3.3 Aire Atrapado en Sistemas de Conducción	49
3.3.1 Efecto de las Bolsas de Aire en Conducciones	50
3.3.2 Revisión del efecto de aire arrastrado	52
4. MODELO EXPERIMENTAL	54
4.1 Geometría del Experimento	55
4.2 Construcción del Modelo	56
1.1 Instrumentación	59
4.4 Calibración del Modelo	62
4.2.1 Nivelación del Modelo Experimental	62



4.5	Determinación de los Coeficientes de Pérdidas por Fricción y Pérdidas Locales en los accesorios del modelo.....	63
4.5.1	Conexión de Tanque a Tubería	65
4.5.2	Conexión de Tanque a Válvula Globo	68
4.5.2	Conexión de Tanque a Tubería (1.8 m)	70
4.5.3	Conexión de Tanque-Tubería y Angulo de 90°	72
4.5.4	Conexión de Tanque-Tubería y Angulo de 45°	75
4.5.5	Conexión de Tanque-Tubería y TEE.....	78
4.6	Resumen de las pérdidas Locales calculadas en el modelo	81
5.	SIMULACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.....	82
5.1	Simulación en EPANET	82
5.2	Pruebas Experimentales de Gasto y Velocidades en el Modelo Físico	84
5.3	Resultados del Cálculo de la Simulación Matemática en EPANET	92
5.4	Simulación en Storm Water Management Model (SWMM).....	110
5.4.1	Onda Dinámica	111
5.5	Resultados del Cálculo de la Simulación Matemática en SWMM.....	112
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES EN EPANET y SWMM	125
6.1	EPANET	125
6.2	SWMM	126
6.3	Propuesta metodológica para el análisis de conducciones a gravedad en relieve accidentado	129
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
8	Bibliografía.....	134
9.	Curriculum Vitae.....	141



INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bolsa de aire en un segmento de tubería operado a gravedad.....	16
Figura 2. Diagrama de Kemison.....	20
Figura 3 Perfil de una Línea de Conducción Discretizada en Puntos de Interes.....	38
Figura 4 Flujo mixto en un conducto	42
Figura 5 Bolsa de Aire en Tuberías	50
Figura 6 Pérdida de Carga Causada por la Presencia de Aire	52
Figura 7 Esquema general del Modelo Hidráulico Experimental	54
Figura 8 Esquema de Ubicación de Piezómetros y Válvulas de Desfogue	55
Figura 9 Ubicación de Modelo Experimental.....	57
Figura 10 Ubicación (2) Modelo Experimental.....	57
Figura 11 Ubicación de accesorios en Modelo Experimental	58
Figura 12 Ubicación de Piezómetros.....	59
Figura 13 Alimentación de Fluido del Modelo Experimental.....	60
Figura 14 Válvulas y Manómetro de Entrada del Modelo Experimental.....	61
Figura 15 Ubicación de Manómetro de Modelo.....	61
Figura 16 Levantamiento Topográfico con Estación Láser (1).....	62
Figura 17 Conexión al Acrílico de Tubería	63
Figura 18 Medición de Conexión de Tanque a Tubería	67
Figura 19 Válvula de Desfogue	68
Figura 20 Tubería de Acrílico para Cálculo de Fricción	70
Figura 21 Codo de 90 grados de Acrílico.....	72
Figura 22 Codo de 45 grados de Acrílico.....	75
Figura 23 Tee de Acrílico.....	78
Figura 24 Flujo con Aire en Tubería.	85
Figura 25 Flujo con Aire en Accesorios.....	85
Figura 26. Modelo de Simulación en EPANET.	92
Figura 27. Modelo de Simulación SWMM.	113



Figura 28. Perfil de simulación en SWMM..... 114

Figura 29. Flujo de Trabajo de Metodología de Análisis de Conducciones a Gravedad. .. 128

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fórmulas de fricción en tuberías. 28

Tabla 2. Geometría del Modelo Experimental. 55

Tabla 3. Configuración de Nodos en Posición y Elevación. 56

Tabla 4. Instrumentación del Modelo Experimental. 60

Tabla 5. Materiales a Utilizar en el Modelo Experimental...... 63

Tabla 6. Medidas para Calculo de "K" de Conexión a tubería. 66

Tabla 7. Medidas para Calculo de "K" de Válvula de Desfogue. 69

Tabla 8. Medidas para Calculo de "n" en tubería de Acrílico. 71

Tabla 9. Medidas para Calculo de "K" para codo de 90 grados de Acrílico. 73

Tabla 10. Medidas para Calculo de "K" para codo de 90 grados de Acrílico (2). 74

Tabla 11. Medidas para Calculo de "K" para codo de 45 grados de acrílico. 76

Tabla 12. Medidas para Calculo de "K" para codo de 90 grados de PVC(2)..... 77

Tabla 13. Medidas para Calculo de "K" para TEE de acrílico. 79

Tabla 14. Medidas para Calculo de "K" para TEE de acrílico (2). 80

Tabla 15. Ecuación de Pérdidas de Accesorios y fricción..... 81

Tabla 16. Descripción de Elementos de Modelo físico. 83

Tabla 17. Datos Medidos de Gasto en Tanque de 30 cm. 86

Tabla 18. Medidas de Gasto con Manómetro y Válvula Reductora en Modelo. 87

Tabla 19. Datos que permiten la elaboración del Histograma de Velocidad Medidos. 89

Tabla 20 Histograma de Gasto Medidos 90

Tabla 21. Histograma de Numero de Reynolds..... 91

Tabla 22. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 30 cm EPANET Nodos..... 93

Tabla 23. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 30 cm EPANET Tuberías. 93

Tabla 24. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 81 cm EPANET Nodos..... 94

Tabla 25. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 81 cm EPANET Tuberías. 94

Tabla 26. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 101 cm EPANET Nodos..... 95

Tabla 27. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 101 cm EPANET Tuberías. 95

Tabla 28. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 132 cm EPANET Nodos..... 96



Tabla 29 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 132 cm EPANET Tuberías.	96
Tabla 30 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 163 cm EPANET Nodos.....	97
Tabla 31 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 163 cm EPANET Tuberías.	97
Tabla 32 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 183 cm EPANET Nodos.....	98
Tabla 33 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 183 cm EPANET Tuberías.	98
Tabla 34 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 203 cm EPANET Nodos.....	99
Tabla 35. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 203 cm EPANET Tuberías.	99
Tabla 36. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 224 cm EPANET Nodos.....	100
Tabla 37. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 224 cm EPANET Tuberías.	100
Tabla 38. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 234 cm EPANET Nodos.....	101
Tabla 39. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 234 cm EPANET Tuberías.	101
Tabla 40. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 244 cm EPANET Nodos.....	102
Tabla 41. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 244 cm EPANET Tuberías.	102
Tabla 42. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 285 cm EPANET Nodos.....	103
Tabla 43. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 285 cm EPANET Tuberías.	103
Tabla 44. Resumen de Cargas Hidráulicas en Simulación en EPANET.....	104
Tabla 45. Resumen de Factores de Fricción en Simulación en EPANET.....	105
Tabla 46. Histograma de Factores de Pérdidas EPANET.	105
Tabla 47. Resumen de Cargas Hidráulicas en los Nodos en Simulación en EPANET.....	106
Tabla 48. Histograma de Simulación de Cargas Hidráulicas en Nodos EPANET.....	107
Tabla 49. Resumen de Gastos Teórico vs Medido.	109
Tabla 50. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 30 cm en SWMM. ..	115
Tabla 51. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 81 cm en SWMM. .	116
Tabla 52. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 101 cm en SWMM.	116
Tabla 53. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 132 cm en SWMM.	117
Tabla 54. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 163 cm en SWMM.	117
Tabla 55. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 183 cm en SWMM.	118
Tabla 56. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 203 cm en SWMM.	118
Tabla 57. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 224 cm en SWMM.	119
Tabla 58. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 234 cm en SWMM.	119
Tabla 59. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 244 cm en SWMM.	120



Tabla 60. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 285 cm en SWMM.	120
Tabla 61. Resumen de Cargas Hidráulicas en Nodos SWMM.	121
Tabla 62. Histogramas de Remen de Cargas Hidráulicas en Nodos SWMM.	122
Tabla 63. Resumen de Presión en Nodos en Simulación en SWMM.	122
Tabla 64. Histograma de Resumen de Presión en Simulación en SWMM.	123

INDICE DE GRÁFICAS

Grafica 1 Gasto vs "K" de conexión de tuberías	67
Grafica 2 Gasto vs "K" de Valula de Desfogue.....	68
Grafica 3 Gasto vs "n" Fricción en tuberías de Acrílico.	70
Grafica 4 Gasto vs "K" de Codo de 90 grados de Acrílico.	72
Grafica 5 Gasto vs "K" de Codo de 45 grados de Acrílico.	75
Grafica 6 Gasto vs "K" de TEE de Acrílico.	78
Gráfica 7. Histograma de Velocidad medida.....	89
Gráfica 8. Histograma de Gasto medido.	90
Grafica 9. Histograma de Numero de Reynolds.....	91
Grafica 10. Carga Hidráulica vs Factor de Pérdida EPANET.....	105
Gráfica 11 Histograma de Factor de Ficción Simulado EPANET.	106
Grafica 12. Carga Hidráulica vs Nodo EPANET.	107
Gráfica 13. Histograma Presión en Nodos EPANET.....	108
Gráfica 14. Líneas Piezométricas Simuladas con el Gasto Medido EPANET.....	108
Grafica 15. Gasto Medido vs Gasto Teórico.	109
Grafica 16. Gasto Teórico y Medido vs Carga Hidráulica Inicial.....	109
Gráfica 17. Histograma Carga Hidráulica Simulados en SWMM.	122
Gráfica 18. Presión vs Nodos en simulación SWMM.....	123
Gráfica 19. Histograma Presión vs Nodos Simulado en SWMM.	123
Gráfica 20 Líneas Piezométricas Simuladas con Gasto Medido en Simulación SWMM..	124
Grafica 21. Perfiles Piezométricos Simulados en EPANET.	125
Gráfica 22. Perfiles Simulados en SWMM.	126



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del Problema

El abastecimiento de agua potable ha representado un problema en continua evolución a lo largo del tiempo por su complejidad, siendo una de las razones para ello, que en el pasado las fuentes que proveían el vital líquido se encontraban cercanas a las comunidades, y por tal motivo era relativamente sencilla la captación de agua en cuerpos de agua superficial o del subsuelo, así como su conducción.

Sin embargo, con el crecimiento de la población y de sus actividades socioeconómicas, también se ha incrementado el aprovechamiento de agua en cuencas y acuíferos, hasta alcanzar actualmente niveles de sobreexplotación. Esto ha ocasionado que las nuevas fuentes de abastecimiento se ubiquen en zonas cada vez más alejadas de los centros de población y consecuentemente las conducciones siguen rutas con mayor longitud y más variantes en los accidentes orográficos presentes en ellas; que ofrecen nuevos retos para la conceptualización y diseño de hidráulico de dicha infraestructura.

Las condiciones físicas descritas en el párrafo anterior, implican cambios en el régimen de operación de las líneas de conducción, con segmentos que funcionan por bombeo y otros que funcionan a gravedad, tras luego de ser disectadas por estructuras que funcionan a superficie libre. Estos cambios de régimen implican que algunos segmentos de las tuberías de conducción funcionen a presión (en ausencia de aire), mientras que otros funcionen a superficie libre (presión atmosférica) y otros a presión, pero en presencia de aire, a una presión distinta de la atmosférica. Debido a estas nuevas condiciones de operación, frecuentes en el abastecimiento de comunidades rurales en zonas serranas, el estudio del análisis hidráulico y del diseño de sistemas de conducción en terrenos escarpados, resulta más pertinente.

En sistemas a bombeo, la presencia de aire se refleja en un incremento en el consumo de energía eléctrica en los equipos; mientras que en sistemas a gravedad las bolsas de aire



estacionarias pueden reducir la sección efectiva del paso de agua, afectando la capacidad de conducción (Ochoa, 2005).

Aunque el aire atrapado en las líneas de conducción puede resultar benéfico para prevenir la cavitación o para reducir los efectos perjudiciales causados por transitorios hidráulicos, en cantidad no controlada puede tener efectos adversos importantes (Ochoa, 2005).

En la actualidad se identifican los problemas que se presentan debido al aire atrapado en los acueductos.

- Thomas (2003) explica que, en sistemas de bombeo, el aire acumulado puede aumentar la carga hidráulica alrededor de 20%, haciendo que las bombas trabajen hasta un 20 % más tiempo, y consecuentemente consumirán más energía durante su operación.
- Se observa un incremento de las presiones durante el arranque o el paro de las bombas.
- Cuando el aire se acumula dentro del conducto a presión forma bolsas que pueden generar contraflujo, con que tiene el potencial de provocar daños importantes en estructuras hidráulicas.
- Las bolsas de aire pueden generar vibraciones en las conducciones durante las transiciones de tubo parcialmente lleno a tubo lleno, lo que puede afectar la integridad de las uniones de la tubería. El aire atrapado en forma de bolsas reduce la sección efectiva de paso de flujo, como resultado se presentan pérdidas de carga hidráulica adicionales en el sistema con lo que se puede afectar la eficiencia de equipos de bombeo, y consecuentemente los consumos de energía eléctrica, así como pérdida de capacidad de conducción.
- La presencia de aire en las conducciones es responsable de lecturas incorrectas en instrumentos de medición de flujos.

Además de las bolsas de aire que se forman preferentemente en los puntos con mayores elevaciones del sistema de conducción (Ochoa, 2005), también, se pueden presentar en segmentos de la tubería con pendiente descendente. En donde, el flujo de agua tratará de desplazar al gas hacia aguas abajo, no obstante, si el tamaño de la bolsa de aire es lo suficientemente grande para que su fuerza de flotación sea igual a la fuerza de arrastre del líquido, la acumulación de gas permanecerá en ese punto de la tubería (ver Figura 1).

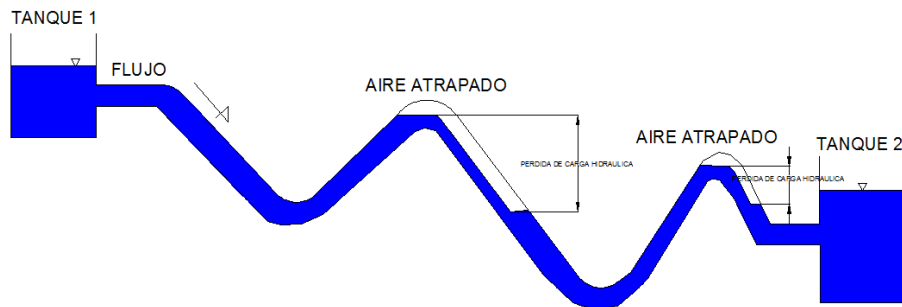


Figura 1. Bolsa de aire en un segmento de tubería operado a gravedad.

En la presente investigación, se planteó estudiar la problemática de diseño para los diferentes regímenes de flujo que se pueden presentar en una conducción a gravedad sobre con topografía accidentada, así como el efecto que puede producir el aire atrapado en ella, incluyendo la afectación en términos de capacidad de flujo. Los problemas de aire atrapado no son restrictivos del tipo de régimen de conducción que se tenga en el acueducto, por lo que pueden presentarse complicaciones tanto en segmentos operando a bombeo, como a gravedad.

1.2 Revisión Bibliográfica

El análisis de fenómenos transitorios en sistemas de distribución de agua es importante debido a la complejidad de los cálculos y las particularidades de las distintas configuraciones de cada sistema. El fenómeno es complejo de analizar incluso para una sola fase (agua). Cuando hay bolsas de aire atrapadas en las instalaciones, el análisis es aún más complejo porque hay dos fluidos (agua y aire) en dos fases diferentes (líquido y gas) (Fuentes V. , 2001)

Los procesos de llenado y vaciado pueden introducir bolsas de aire atrapadas en las tuberías, por lo que se requiere la implementación de ecuaciones hidráulicas (fase de agua) y termodinámicas (fase de aire), ya que los modelos de flujo transitorio típicos (por ejemplo, Allievi, Hammer, entre otros) no son capaces de predecir un flujo de dos fases (agua y aire). Estos procesos deben ser implementados por el personal técnico que trabaja en los sistemas de suministro de agua para proteger las instalaciones hidráulicas.



Estas operaciones se realizan periódicamente en instalaciones hidráulicas reales. La operación de llenado puede generar sobrepresiones peligrosas cuando las bolsas de aire se comprimen rápidamente y las válvulas de aire no expulsan suficiente cantidad de aire (Izquierdo, *et al*, 1999; Zhou & Liu, 2013; Wang, Wang, *et al*, 2017); mientras que la operación de vaciado puede producir valores de presión sub-atmosférica debido a la expansión de las bolsas de aire si las válvulas de aire no son capaces de admitir flujo de aire con una proporción similar al agua drenada (Coronado-Hernandez, *et al*, 2017b). Los valores extremos de la presión absoluta dependen de las características de las instalaciones (diámetro interno, rugosidad y pendiente de la tubería). Las presiones extremas pueden afectar no solo a las tuberías, sino también a sus dispositivos (empalmes, estaciones de bombeo y válvulas).

Los sistemas de distribución de agua pueden experimentar patrones de presión sub-atmosférica debido a la presencia de flujo transitorio en dos escenarios: (i) en una sola fase (agua), como ocurre al detener las bombas o al cerrar válvulas; y (ii) en un flujo de dos fases (mezcla de aire y agua) que se produce durante un proceso de vaciado. Actualmente, no existe un modelo matemático que simule con precisión el flujo transitorio durante el vaciado de agua, lo cual es fundamental para garantizar la protección de las tuberías. En este sentido, es necesario dimensionar los dispositivos de protección no solo para flujos transitorios en una sola fase (práctica común), sino también durante el proceso de vaciado (práctica descuidada). Por lo tanto, es crucial utilizar la condición más crítica para dimensionar la resistencia de las tuberías, teniendo en cuenta el valor mínimo de presión sub-atmosférica alcanzado durante los flujos transitorios (tanto en una sola fase como en dos fases) y las características de las instalaciones de tuberías, como el tipo de suelo en condiciones naturales, el tipo de relleno y la profundidad de cobertura.

El aire dentro de un sistema de conductos a presión puede removerse hidráulicamente por:

- a) La turbulencia que provoca un salto hidráulico ahogado,
- b) El empuje hidrodinámico sobre el volumen de aire atrapado en un tramo de la línea,
- c) El desplazamiento que impone el esfuerzo cortante del agua sobre la interfaz con el aire en condiciones de superficie libre; y



- d) La acción del empuje del agua sobre el aire en toda la sección transversal del conducto, similarmente a la que ejerce un émbolo en una cámara de compresión

Se han reportado algunos estudios experimentales y semi-empíricos sobre la remoción del aire atrapado en el flujo por conductos, que han permitido ampliar el conocimiento del fenómeno; no obstante, todo ello no es suficiente puesto que, como se verá después, persisten varias incógnitas relacionadas con la formación y evolución del aire atrapado (Ochoa, 2005). Además, poco se ha planteado en relación con la modelación matemática del evento.

Para determinar la relación que existe entre los gastos de agua y aire, por el efecto de un salto hidráulico ahogado que se forma aguas abajo del aire atrapado, destacan los trabajos de Kalinske y Robertson (1943) Ahmed, Ervine y McKeogh y Thomas (1982). Por su parte Kalinske y Bliss (1943), Kent, Runge y Wallis (1965), Benjamín (1968), Martin y Curtet (1973) y Fuentes (1970) han investigado la remoción de aire atrapado mediante empuje hidrodinámico. Algunos autores, como Kennison (1943), Falvey y Sikora (1980), se han enfocado más a determinar la cantidad de aire que se remueve por el esfuerzo cortante o inyección, cuando el tubo funciona parcialmente lleno.

En México solamente han reportado trabajos Arreguín y Chávez (1984), que estudiaron experimentalmente la inclusión de aire en agua a superficie libre, y Sánchez, Rodal y Hernández (1993) sobre un estudio experimental de la estabilidad de pequeñas burbujas de aire en conductos.

Kalinske y Robertson (1943). - Estudiaron la entrada y remoción de aire en tuberías de agua, mediante la formación de un salto hidráulico. De datos experimentales, encontraron que la relación de agua - aire removido β , se ajusta a la Ec. (1).

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(F - 1)^{1.4} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde, F es el número de Froude en el tirante conjugado menor del salto hidráulico, Q_a es el gasto de aire removido y Q_w es el gasto de agua, ambos con las mismas unidades.



Establecieron que esta condición es válida cuando todo el aire que ingresa en la turbulencia del salto es arrastrado por el flujo.

Kalinsnke y Bliss (1939).- Igualaron las fuerzas teóricas de desplazamiento y arrastre sobre el aire atrapado en equilibrio y desarrollaron experimentalmente una expresión que relaciona la pendiente del tubo con el gasto necesario para iniciar el movimiento del aire aguas abajo de un salto hidráulico. Sus resultados relacionan a la pendiente, $\text{sen } \theta$, con el número de Eotvos, $E = \sigma / \gamma D^2$ y el parámetro $(Q_c^2 / g D^5)$; en donde σ , representa la tensión superficial del agua, γ su peso específico, θ y D son el ángulo de inclinación y el diámetro del conducto, respectivamente.

Kennison (1943).- Desarrolló un diagrama (ver Figura 2) para determinar las condiciones hidráulicas dentro de un conducto cerrado parcialmente lleno conteniendo aire, donde θ es el ángulo de inclinación del conducto, Q es el gasto, Q_c es el gasto crítico, F es el número de Froude, D es el diámetro del conducto, d es el tirante de agua, R es el radio hidráulico y S es la pendiente. Específicamente, se puede obtener:

- a) El gasto crítico ($F=1$) en función del tirante del flujo;
- b) El gasto para cualquier tirante y pendiente;
- c) Dada una pendiente y un tirante, el flujo mínimo requerido para que el salto hidráulico ahogue el conducto;
- d) El número de Froude para flujo uniforme en cualquier tirante y pendiente.

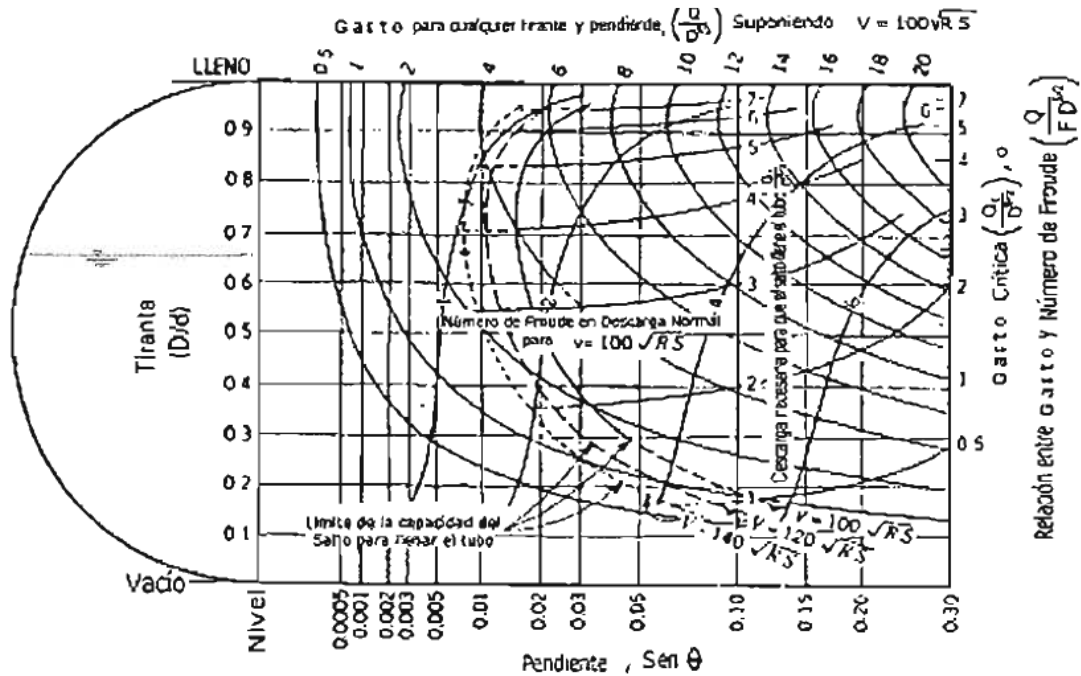


Figura 2. Diagrama de Kemison.

Existen pocas investigaciones encontradas en la literatura técnica, para determinar las sobrepresiones que resultan al remover de un conducto el aire atrapado entre dos columnas de agua, como las de Martin 1976) Carmona, Sánchez y Valencia 1989), Abreu (1991) y Guarga (1996). También, se han desarrollado algunos modelos de simulación de llenado de conductos, como los de Safwat, Arastu y Husaini (1986), Liou y Hunt (1996), que consideran que el agua avanza en forma perpendicular al conducto, como si se tratara de un pistón.

Sobre la determinación de la pérdida de carga piezométrica solamente se encuentra reportado un trabajo experimental de Rodal (2000), mientras tanto, para la cuantificación de los efectos de sobrepresión por la remoción del aire atrapado, ocupando una parte de la sección transversal del conducto, no se encontraron publicaciones a la fecha.



1.3 Justificación

Actualmente, cuando se diseña la tubería de un sistema de conducción de agua que va a operar a gravedad, se asume generalmente, que el flujo de agua llenará la tubería en toda su longitud. En este caso el gasto de la tubería está controlado por la carga disponible, el diámetro, las pérdidas por fricción y locales que se pueden presentar en la conducción. Pero, si por alguna razón la tubería no está completamente llena (como suele ocurrir en zonas con topografía accidentada), la relación entre la carga hidráulica y el caudal serán muy diferentes a lo calculado con la consideración de que el tubo está lleno de líquido y hay ausencia de aire.

Se hace notar que hay aportes técnicos y publicaciones científicas escasos en relación con la determinación del gasto real que pueden conducir estos sistemas a gravedad cuyo propósito principal es el abasto de agua a una población para que no carezcan del vital líquido. Dichas publicaciones se enfocan en el análisis del aire atrapado, su remoción, así como en las ecuaciones que intervienen en el fenómeno observado, asumiendo que en todos estos casos será posible eliminar la obstrucción por acumulación de aires, sin embargo, el análisis de la capacidad de conducción se analiza o se aborda superficialmente.

No hay mucho avance en el análisis del aire atrapado presentado en conducciones a gravedad, cuando este ocupa solo una parte de la sección transversal del conducto. Esto se debe a que el análisis de la remoción de aire atrapado en conducciones a gravedad es complicado, ya que se producen fenómenos de una gran complejidad, pues se presentan flujos con presencia de interfaces agua-aire, que pueden estar a presión atmosférica (superficie libre) o distinta de la atmosférica; además, se pueden generar fenómenos transitorios rápidos (golpe de ariete) o lentos (oscilación de masa), con cambios importantes en la capacidad de conducción, en la presión y en la velocidad del flujo.

Por todo lo expuesto anteriormente, resulta importante analizar las posibilidades que ofrece el campo de las ecuaciones fundamentales del movimiento de fluidos en dos fases, con el fin de mejorar los modelos que simulan el comportamiento del aire en un conducto cerrado, sujeto a distintos regímenes de operación.



1.4 Objetivo General

Desarrollar una metodología para el análisis hidráulico aproximado de sistemas de conducción en relieves accidentados, que considere múltiples condiciones de flujo. Esta metodología deberá contemplar el flujo Uniforme-Permanente (Tubo Completamente Lleno); flujo No Uniforme-Permanente (Superficie Libre); el flujo en dos fases homogéneo, separado y/o relativo; así como el aire atrapado en la conducción.

1.4.1 Objetivos Específicos:

- Determinar experimentalmente los coeficientes de pérdida por fricción y pérdidas locales de la tubería empleada en el modelo físico, evaluando su variación bajo distintos gastos de operación, para establecer parámetros hidráulicos representativos que permitan mejorar la estimación de pérdidas de carga en conducciones a gravedad sobre relieve accidentado
- Realizar con base del método científico y como complemento a la información técnica disponible un modelo experimental para observar y analizar el comportamiento del flujo en las tuberías.
- Desarrollar la metodología para el análisis hidráulico de conducciones a gravedad.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Ecuaciones de Gobierno

El movimiento de un fluido newtoniano se rige por las ecuaciones de Navier-Stokes, obtenidas al aplicar las leyes físicas de conservación de masa, de cantidad de movimiento y de propiedades termodinámicas a un volumen de control. Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales en tres dimensiones (3D), para las cuales no se dispone de una solución analítica. Estas ecuaciones permiten describir entre otros, el movimiento de la atmosfera terrestre, corrientes oceánicas y el flujo de agua en cauces canales y tuberías (Tan, 1992).

En su gran mayoría estos flujos presentan números de Reynolds suficientemente altos como para ser completamente turbulentos. La turbulencia es un estado del flujo que consiste en movimientos que aparecen y desaparecen aparentemente caóticos, con escalas de tiempo y longitud (remolinos o vórtices) que abarcan una gran variedad de tamaños (Versteeg & Malalasekera, 2007). A la hora de resolver estas ecuaciones caben distintas filosofías, enfoques y aproximaciones.

En la mecánica de fluidos, los métodos de análisis se basan en dos filosofías para describir el flujo. La filosofía Lagrangiana estudia la evolución de las variables del flujo siguiendo el movimiento o la trayectoria de las partículas del fluido en el espacio, mientras que la filosofía Euleriana estudia la evolución temporal de las variables del flujo en un volumen de control fijo en el espacio, observando el intercambio de los principios físicos fundamentales. Cada una implica técnicas distintas de tratamiento de las ecuaciones y discretización del medio fluido (Liu & Liu, 2003).

Esta investigación se enfoca en la filosofía Euleriana. Actualmente, simular flujos turbulentos de interés práctico a través de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes es bastante complicado, ya que es necesario utilizar una malla de cálculo con un tamaño de elementos no mayor al tamaño del remolino más pequeño presente en el flujo y un paso de tiempo no mayor que la escala de tiempo del remolino más pequeño, para resolver las oscilaciones de alta frecuencia presentes en el flujo, lo que lleva a una malla de cálculo con



un número de elementos muy elevado y poco realista a la vista de la velocidad de cálculo de los ordenadores actuales, incluso por un periodo de tiempo largo. Una caracterización completa de flujos turbulentos es imposible a través de técnicas experimentales, por lo que un análisis con métodos numéricos es más prominente. En este sentido, las aproximaciones numéricas para el análisis de flujos turbulentos pueden dividirse en dos grupos: la simulación y la modelación (Zikanov, 2010).

Dentro del primer grupo encontramos la primera aproximación, la simulación numérica directa (DNS, acrónimo del inglés *Direct Numerical Simulation*) que permite calcular todas las escalas de movimientos presentes en el fluido discretizando directamente las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes sin ninguna modificación o suposición, con lo que ello implica. Dado que lo anterior es computacionalmente muy caro, no es posible usar DNS en casos de interés práctico y su uso está limitado a la investigación de flujos con propiedades turbulentas fundamentales con geometrías muy simples y números de Reynolds bajos (Hirsch, 2007).

Una segunda aproximación dentro del primer grupo a la hora de resolver las ecuaciones de Navier- Stokes, es la simulación de grandes remolinos (LES, acrónimo del inglés *Large Eddy Simulation*), que consiste en simular de forma directa únicamente los grandes remolinos que son propensos a ser afectados por las condiciones de contorno; los remolinos de menor dimensión (escalas disipativas), los cuales son relativamente independientes de las condiciones de contorno necesitan ser modelados con algún modelo de turbulencia sencillo, con lo cual se pueden obtener buenos resultados.

Bajo estas condiciones, se reduce significativamente el costo computacional en comparación con la DNS, y es posible simular flujo con geometrías complejas y números de Reynolds altos de forma realista, pero con poca aplicabilidad en la ingeniería práctica. La aproximación LES consiste en filtrar las ecuaciones de Navier- Stokes, de tal forma que el flujo con movimientos turbulentos de escala grande se separe de los remolinos de pequeña escala, resultando en ecuaciones en 3D dependientes del tiempo y del espacio (Ferziger & Peric, 2002).



Una tercera aproximación clasificada dentro del grupo de modelación, es el uso de las ecuaciones de Reynolds (RANS, acrónimo del inglés *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations*), que incorporan un modelo de turbulencia apropiado. Las RANS se obtienen al considerar variables medias en el tiempo, es decir, cualquier variable instantánea se puede descomponer mediante la suma de las fluctuaciones turbulentas más un valor promedio en un cierto incremento de tiempo (descomposición de Reynolds); estas suposiciones son útiles en algunos campos de la industria, dado que no es necesario conocer todos los detalles del flujo. Su resolución exigiría una discretización tridimensional del dominio de estudio bastante menos costoso computacionalmente relativo a la DNS y LES, pero aún caro computacionalmente para las aplicaciones de ingeniería (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Para resolver las ecuaciones de Reynolds se deben determinar de alguna manera las tensiones turbulentas o tensiones de Reynolds. Las tensiones turbulentas representan el transporte de la cantidad de movimiento debido a las fluctuaciones turbulentas y aparecen a consecuencia de la no linealidad de los términos convectivos al promediar en el tiempo. Esto no se puede determinar con exactitud, pero se pueden estimar mediante una viscosidad turbulenta y es el objetivo de los distintos modelos de turbulencia (Rodi, 2000).

El uso de las RANS tiene la ventaja de utilizar una malla de cálculo con elementos relativamente grandes, aun así, es evidente que su empleo para el cálculo de flujo en ríos, en ocasiones es muy difícil de emplearlos a consecuencia de la velocidad de los ordenadores. Por lo tanto, algunas simplificaciones son necesarias en las ecuaciones de gobierno resultan necesarias para reducir las dimensiones del problema.

Los tipos de flujo que trataremos en este trabajo (flujo de agua en cauces naturales o artificiales, canales, calles, llanuras y conductos) encajan dentro de flujo de aguas poco profundas (longitud de la escala vertical más pequeña comparada con la longitud de la escala horizontal), por lo que es posible simplificar estas ecuaciones en 3D más generales pero computacionalmente costosas en ecuaciones en 2D y en 1D según convenga y obtener resultados lo suficientemente precisos y con un coste computacional asumible. La deducción de las ecuaciones correspondientes, se describe en los siguientes apartados.



2.1.1 Ecuaciones de flujo en lámina libre 1D

La siguiente simplificación consiste en la deducción de las ecuaciones de Saint Venant en 1D. Ecuaciones clásicas de hidráulica que muchas veces son suficientes para representar correctamente el movimiento no permanente en lámina libre en cauces naturales o artificiales, canales y tuberías, debido a su marcada unidimensionalidad. Estas ecuaciones son válidas cuando el flujo que se quiere representar presenta velocidad uniforme y superficie libre del agua horizontal en toda la sección transversal, presión hidrostática y pendiente del fondo suave.

La deducción de las ecuaciones de Saint Venant en 1D, se realiza directamente aplicando las leyes de conservación de la masa y cantidad de movimiento, a un volumen de control considerando una sección arbitraria y canal no prismático, resultando en un sistema de ecuaciones en forma conservativa (Chaudhry M. H., 1993):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gI_1 + gA(S_0 - S_F) \quad \text{Ec. 3}$$

Utilizando notación vectorial, resulta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{F} = \mathbf{H} \quad \text{Ec. 4}$$

Las cuales responden a las expresiones:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} A \\ Q \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ gI_1 + gA(S_0 - S_F) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 5}$$

En las expresiones anteriores, A es el área de la sección mojada, Q el caudal circulante, S_0 la pendiente del terreno, S_F la pendiente de fricción, I_1 la fuerza debida a la presión del agua en una sección e I_2 la contribución de las fuerzas de presión del contorno; las tres últimas se expresan respectivamente como:



$$S_f = \frac{V^2 n^2}{R_h^{4/3}} \quad \text{Ec. 6}$$

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta) b(x, \eta) d\eta \quad \text{Ec. 7}$$

$$I_2 = \int_0^h (h - \eta) \frac{\partial b(x, \eta)}{\partial x} d\eta \quad \text{Ec. 8}$$

Donde n es el coeficiente de fricción de Manning, R_h el radio hidráulico. Para canales prismáticos, aunque tengan una sección cualquiera, el término I_2 es idénticamente igual a cero.

2.1.2 Ecuaciones de flujo a presión en 1D

Las ecuaciones de flujo variable en presión, al igual que las de flujo en lámina libre en 1D, se obtienen directamente aplicando las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, a un volumen de control, resultando un sistema de ecuaciones en forma conservativa (Bourdarias & Gerbi, 2007) (Leon, Ghidaoui, Schmidt, & Garcia, 2010):

$$\frac{\partial \rho A}{\partial t} + \frac{\partial \rho Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

$$\frac{\partial \rho Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{Q^2}{A} + Ap \right) = \rho g A (S_0 - S_F) \quad \text{Ec. 10}$$

Utilizando notación vectorial, resulta:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{F} = \mathbf{H} \quad \text{Ec. 11}$$

Las cuales responden a las expresiones:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho A \\ \rho Q \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho Q \\ \rho \frac{Q^2}{A} + Ap \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho g A (S_0 - S_F) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde A es el área mojada de la sección transversal máxima, p la presión, ρ la densidad del fluido, a la celeridad de la onda de presión y S_f la pendiente de fricción que se puede expresar en función de la fórmula de Manning o Darcy-Weisbach respectivamente, como:



$$S_f = \frac{v^2 n^2}{R_h^{4/3}} \quad \text{Ec. 13}$$

$$S_f = \frac{f}{4R_h} \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning y f el factor de fricción de Darcy-Weisbach, que es función de la rugosidad relativa del conducto $k=\mathcal{E}/D$ ($\mathcal{E}$ y D rugosidad y diámetro del conducto respectivamente) y del número de Reynolds Re (Tabla 1).

La fórmula de Manning es aplicable a conductos completamente rugosos y régimen turbulento, mientras que la fórmula de Darcy-Weisbach se aplica a conductos lisos y rugosos en régimen laminar, transicional y turbulento.

Tabla 1. Fórmulas de fricción en tuberías.

Conducto	Régimen	Re	Formula	Autor
Liso/Rugoso	Lamina	<2,300	$f = \frac{64}{Re}$	Hagen-Poiseuille, 1846
Liso	Transición/ Turbulento	>4,000	$\frac{1}{f} = 2 \log_{10}(Re \sqrt{f}) - 0.8$	Prandtl-Karman, 1930
Liso/Rugoso	Transición	4,000- 10,000	$\frac{1}{f} = -2 \log_{10} \left(\frac{k}{4R_h 3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$	Colebrook-White, 1939
Rugoso	Turbulento	>10,000	$\frac{1}{f} = 2 \log_{10} \left(\frac{2R_h}{k} + 1.74 \right)$	Prandtl-Karman, 1930

Para las fórmulas donde el factor de fricción se encuentra de forma implícita, se puede utilizar la ecuación (15), para obtener una primera aproximación del factor de fricción con un error menor al 0.63 % (Swamee & Jain, 1976). El factor de fricción se puede calcular con mayor precisión utilizando un método iterativo y como valor inicial el obtenido anteriormente. Así, el valor de la primera iteración se obtiene al sustituir el valor inicial en el lado derecho de la ecuación implícita correspondiente y con ello un nuevo valor para el factor de fricción se obtiene del lado izquierdo de dicha ecuación, este valor será el nuevo valor inicial.



Este proceso puede ser repetido hasta que la diferencia en el valor del factor de fricción de las dos últimas iteraciones sea menor a un valor previamente establecido, o hasta que el valor del factor de fricción en dos iteraciones consecutivas sea similar. Otra opción es utilizar el método de Newton-Raphson:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k/D}{3.71} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ec. 15}$$

La celeridad de la onda acústica o celeridad de la onda de presión a se puede obtener con (Ghidaoui, Zhao, McInnis, & Axworthy, 2005) (Wylie, Streeter, & Suo, 1993):

$$\frac{1}{a^2} = \frac{d\rho}{dp} + \frac{\rho}{A} \frac{dA}{dp} \quad \text{Ec. 16}$$

El primer término de lado derecho representa el efecto de la compresibilidad del fluido, y el segundo el efecto de la flexibilidad del conducto sobre la velocidad de la onda de presión.

Relacionando los términos del lado derecho de la ecuación anterior con las propiedades materiales del fluido y las propiedades materiales y geométricas del conducto tenemos:

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\rho}{K} + \frac{\rho}{E} \frac{e}{D} \quad \text{Ec. 17}$$

O bien,

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{DK}{eE}}} \quad \text{Ec. 18}$$

Si el conducto es completamente rígido, la celeridad de la onda de presión en un fluido compresible se obtiene haciendo $dA/dp = 0$, tal que:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \frac{1}{\sqrt{\beta\rho}} \quad \text{Ec. 19}$$

En cambio, la celeridad de la onda de presión en un fluido incompresible con un conducto flexible se obtiene haciendo $d\rho/dp = 0$, de donde:

$$a = \sqrt{\frac{Ee}{D\rho}} \quad \text{Ec. 20}$$



En las expresiones anteriores D es el diámetro del conducto, E el módulo de elasticidad de Young del material del conducto, e el grosor de la pared del conducto, p la presión, ρ la densidad, β el coeficiente de compresibilidad del fluido y K el módulo de elasticidad volumétrica del fluido, que se puede expresar en función de la presión y el volumen V , como:

$$K = - \frac{\Delta p}{\Delta V/V} \quad \text{Ec. 21}$$

Cada una de las ecuaciones forma un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, hiperbólico y no lineal, que no tienen solución analítica, salvo para casos muy concretos, por lo que es necesario el uso de métodos numéricos para obtener su solución y constan de tres términos. El primero representa la variación temporal en un punto fijo de las variables hidráulicas: masa y cantidad de movimiento; el segundo la variación espacial de los flujos de dichas cantidades; el tercero la ganancia o pérdida de masa y cantidad de movimiento.

2.1.3 Ecuaciones de la onda Cinemática en 1D

Cuando la velocidad y capacidad de los ordenadores son limitada o cuando el tipo de flujo o zona de estudio en cuestión así lo requiere, las ecuaciones de Saint Venant en 1D se simplifican. Las aproximaciones más habituales en función de los términos de la ecuación de cantidad de movimiento son la onda dinámica cuasi-permanente, la onda difusiva y la onda cinemática (Chaudhry M. H., 1993).

La aproximación de la onda cinemática desprecia los términos de la aceleración local de la velocidad, los términos inerciales y los términos de presión y solamente considera el término de fricción S_f y de la pendiente del fondo S_o por lo que, la ecuación de cantidad de movimiento queda:

$$S_f = S_o \quad \text{Ec. 22}$$

Lo que significa que para todo Δt y dentro de cada intervalo Δx , la superficie libre del agua es paralela al fondo de la superficie, lo que equivale a considerar localmente un movimiento



uniforme. Bajos estas condiciones y si no hay efectos de reflujo hacia aguas arriba. Así, las ecuaciones de la onda cinemática en 1D, para el flujo en la dirección x son (Gomez, 2008):

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i - f \quad \text{Ec. 23}$$

$$q = \alpha h^m \quad \text{Ec. 24}$$

Donde h es el calado, q el caudal unitario, i la lluvia en exceso, f las pérdidas por infiltración, α y m son parámetros de la propagación de la onda que son directamente relacionados a las características del flujo. De esta forma, si comparamos la ecuación anterior con la fórmula de Manning (2.15), obtenemos que:

$$\alpha = \frac{1}{n} S_o^{1/2} \quad \text{Ec. 24}$$

$$m = 5/3 \quad \text{Ec. 25}$$

2.2 Modelos Matemáticos

El análisis de los fenómenos transitorios de una sola fase (solo agua) es complejo debido a la resolución de los cálculos y la configuración de los sistemas de tuberías de agua. Los procesos de llenado y vaciado son demasiado complejos como para ser capturados por modelos de una sola fase, ya que hay dos fluidos (agua y aire) en dos fases (líquido y gas) (Fuentes V. , 2001). Estas operaciones deben realizarse periódicamente en las tuberías para el mantenimiento, limpieza o reparación por parte del personal técnico (Fuertes-Miquel, *et al*, 2018). La planificación de los sistemas de distribución de agua requiere considerar los efectos de las bolsas de aire atrapadas para garantizar procedimientos exitosos de mantenimiento y reparación exitosos.

Durante los procesos de llenado, las bolsas de aire pueden comprimirse rápidamente, produciendo sobrepresiones; durante los procesos de vaciado, las bolsas de aire se expanden, generando condiciones sub-atmosféricas. Como consecuencia, es crucial modelar la fase de aire para determinar los valores extremos de la presión absoluta. Se debe considerar la



correcta identificación del tipo de modelo (adiabático, politrópico o isotérmico) y la caracterización de las válvulas de aire.

Los efectos del aire atrapado en las tuberías de agua se generan básicamente debido a dos características:

- La densidad del aire es mucho menor que la densidad del agua en una proporción aproximada de 1:800 considerando condiciones atmosféricas y una temperatura de 20°C
- La elasticidad del aire es mucho mayor que la elasticidad del agua. La elasticidad depende del tipo de proceso (isotérmico, politrópico o adiabático) y de la presión absoluta de la bolsa de aire. Por ejemplo, el módulo de compresibilidad volumétrica en un proceso isotérmico, en condiciones atmosféricas, presenta una proporción de 20,000 veces, y para una presión absoluta de 10 bares, la proporción es de 2,000 veces.

Algunos de los problemas causados por las bolsas de aire atrapadas son:

- Pérdidas de carga adicionales debido al aumento de la velocidad del agua como consecuencia de la reducción de la sección transversal (Stephenson,, Effects of air valves and pipework on water hammer pressures, 1997)
- Sobrepresiones al iniciar o detener el sistema debido a la compresión de la bolsa de aire
- reducción de la eficiencia de las bombas
- Vibraciones en las tuberías, que generan cambios rápidos en el patrón de velocidad del agua
- Corrosión de las tuberías debido a cambios en la temperatura y en la presión absoluta
- Caídas de presión sub-atmosférica debido a la expansión de la bolsa de aire (Coronado-Hernandez, *et al*, 2018).

Las bolsas de aire atrapadas son un problema para las operaciones de tuberías. Es importante realizar correctamente el proceso de llenado para eliminar las bolsas de aire de los sistemas hidráulicos. Sin embargo, el aire atrapado también puede ingresar a través de válvulas de aire, empalmes y válvulas durante la detención y falla de los sistemas hidráulicos, durante la liberación de aire disuelto y mediante la generación de vórtices en las entradas de las bombas.



Los puntos altos a lo largo de las tuberías son lugares propensos a la acumulación de bolsas de aire (AWWA, 2001) (Ramezani, & Karney, 2017) , las cuales pueden experimentar aumentos de presión durante un proceso de llenado (Zhou, *et al*, 2013; Fontana, *et al*, 2016; Martins, *et al*, 2016; Covas, *et al*, 2010); o caídas de presión sub-atmosférica durante un proceso de vaciado (Fuertes-Miquel, Coronado-Hernandez, Mora-Melian, & Iglesias-Rey, 2018); (Tijsseling, Hou, Bozkus, & Laanearu, 2016); (Coronado-Hernandez, *et al*, 2018). Las válvulas de aire se utilizan como dispositivos de protección para evitar estas situaciones (AWWA, 2001).

El aire atrapado puede ser expulsado a la atmósfera mediante empalmes permanentes de sistemas hidráulicos (condiciones aguas abajo, hidrantes contra incendios, entre otros), pero el método más común es mediante válvulas de aire ubicadas a lo largo del sistema (Martino, Fontana, & Giugni, 2001), como en puntos altos u otros lugares donde el aire atrapado puede acumularse. El vaciado y llenado de una tubería no se puede simular con los paquetes comerciales transitorios 1D comúnmente utilizados, como Bentley Hammer, H2O Surge, Allievi, entre otros, ya que no son capaces de predecir un flujo bifásico (agua y aire).

Los modelos matemáticos resultan complejos de desarrollar cuando existe separación de columna de agua (Bergant, Simpson, & Tijsseling, 2006). La separación de columna de agua puede ocurrir por diferentes razones, como

- Cavitación (Yang, 2001),
- Cuando el movimiento de la columna de agua encuentra una bolsa de aire atrapada, como ocurre durante los procesos de llenado y vaciado (Martins, *et al*, 2017)
- Por la liberación del aire disuelto en agua saturada (Ramezani, *et al*, 2016).

Las tuberías siempre transportan una mezcla de aire y agua durante las operaciones de llenado y vaciado. Dependiendo de las características del flujo y las condiciones de las tuberías, estas operaciones se pueden modelar utilizando un modelo de flujo de pistón (Cabrera, *et al*, 1992) o un modelo de flujo bifásico (Bousso, Daynou, & Fuamba, 2013). Las suposiciones para aplicar estos modelos dependen de la velocidad del agua, el diámetro interno y de la pendiente hidráulica.



El modelo de flujo de pistón se puede utilizarse cuando un evento hidráulico ocurre rápidamente. En este caso, la interfaz aire-agua es perpendicular a la dirección de la tubería (Fuentes V. , 2001); (Lee, 2005). Como consecuencia, a lo largo de la tubería, hay ramificaciones de la tubería completamente llenas de agua y el resto de aire. Cuanto menor sea el diámetro interno, mayores serán la velocidad del agua y la pendiente de la tubería. El modelo de flujo de pistón es utilizado por la mayoría de los modelos matemáticos para simular los procesos de llenado y vaciado en tuberías (Liou & Hunt, 1996); (Zhou, Liu, & Karney, Phenomenon of white mist in pipelines rapidly filling with water with entrapped air pocket, 2013); (Coronado-Hernandez, *et al*, 2017b); (Fuertes-Miquel, *et al*, 2016). La longitud de una columna de agua (L) y su velocidad de agua (v_w) están relacionadas por la siguiente formulación: $dL/dt = v_w$ (Izquierdo, *et al*, 1999); (Zhou, Liu, & Karney, 2013a).

Los modelos de flujo bifásico se pueden utilizarse para analizar flujos transitorios lentos y una pequeña cantidad de volumen de aire. La ocurrencia de cavitación es una aplicación de estos modelos en sistemas presurizados. Estos modelos se clasifican como flujo de burbujas, flujo de burbujas y bolsas de aire, flujo tapón, flujo de onda estratificado y flujo liso estratificado (Bousso, Daynou, & Fuamba, 2013). Otros trabajos (Vasconcelos & Wright, Rapid flow startup in filled horizontal pipelines, 2008); (Vasconcelos, *et al*, 2011); (Guinot, 2001) utilizaron modelos de flujo bifásico para comprender el comportamiento del flujo transitorio con aire atrapado en flujos de superficie libre.

Los modelos inerciales se pueden utilizar para simular fenómenos transitorios (Abreu, *et al*, 1999) como los procesos de llenado y vaciado en tuberías presurizadas. Los modelos inerciales consideran la inercia del sistema. Hay dos tipos de modelos inerciales:

- Modelos de golpe de ariete o elásticos, que consideran la elasticidad de la tubería y el agua;
- Modelos de oscilación de masa o rígidos, que no tienen en cuenta estos factores.

El modelo elástico se puede escribir en forma simplificada de la siguiente manera (Chaudhry M. , 2014); (Wylie & Streeter, 1993):



- Conservación de la Masa:

$$\frac{gA}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_w}{\partial X} = 0 \quad \text{Ec. 26}$$

- Ecuación de Momentum:

$$\frac{\partial Q_w}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial X} + f \frac{Q_w |Q_w|}{2DA} = 0 \quad \text{Ec. 27}$$

donde g es la aceleración debido a la gravedad, A es el área de la sección transversal de la tubería, t es el tiempo, a es la velocidad de la onda, X es la distancia a lo largo de la tubería, H es la carga piezométrica, Q_w es el caudal de agua, f es el factor de fricción y D es el diámetro interno.

Los modelos elásticos se han utilizado para analizar los procesos de llenado en tuberías de agua y analizar la influencia de bolsas de aire atrapadas (Zhou, *et al*, 2011a), los efectos de dos bolsas de aire atrapadas (Zhou, Liu, & Karney, 2013a), el fenómeno de la niebla blanca con bolsas de aire atrapadas y las consecuencias de usar una derivación (Wang *et al.*, 2017). Sin embargo, la elasticidad de una bolsa de aire atrapada en una tubería es mucho mayor que la elasticidad del agua y la de la tubería. Como consecuencia, a / Dt o $Dh / Dt \approx 0$, lo que implica que la fase del agua se puede modelarse mediante el modelo de agua rígida (RWM). La ecuación de conservación de masa se reduce a:

$$\frac{\partial Q_w}{\partial X} = 0 \rightarrow Q_w = Q_w(t) \quad \text{Ec. 28}$$

Donde la ecuación de Momentum puede ser expresada como:

$$H_u = H_d + \frac{fL}{2gDA^2} Q_w |Q_w| + R_v Q_w |Q_w| + \frac{L}{gA} \frac{dQ_w}{dt} \quad \text{Ec. 29}$$

donde H_u es la carga piezométrica aguas arriba, H_d es la carga piezométrica aguas abajo y R_v es el coeficiente de resistencia de la válvula.

Se han llevado a cabo varias investigaciones que utilizan modelos rígidos para procesos de llenado. (Izquierdo, *et al*, 1999) y (Liou & Hunt, 1996) aplicaron el modelo rígido para analizar una tubería de agua con diferentes bolsas de aire, (Zhou, Hicks, & Steffler, Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air, 2002) presentaron el análisis



del flujo transitorio en una tubería horizontal de llenado rápido con una bolsa de aire atrapada, y (Hou, *et al*, 2014) investigaron una tubería a gran escala. En cuanto al proceso de vaciado, (Laanearu, *et al*, 2012) analizaron experimentalmente esta operación en una tubería a gran escala mediante aire presurizado, (Tijsseling, *et al*, 2016) propusieron un modelo semiempírico para predecir el proceso de vaciado mediante aire presurizado, (Fuertes-Miquel, Coronado-Hernandez, Iglesias-Rey, & Mora-Melia, 2018b) propusieron y validaron un modelo matemático de una tubería única, y (Coronado-Hernandez, *et al*, 2017 b) estudiaron los procesos de vaciado utilizando diversas válvulas de aire en una tubería de agua. Se han establecido modelos de CFD para simular procesos de llenado y vaciado (Martins, *et al*, 2017).

2.2.1 Modelo de Columna Rígida

Ventaja: Los modelos proporcionan resultados similares en comparación con el modelo de agua elástica porque la elasticidad de las bolsas de aire es mucho mayor que la elasticidad de la tubería y el agua (Coronado-Hernandez, *et al*, 2018). Los procesos de llenado y vaciado con válvulas de aire han sido desarrollados por (Fuertes-Miquel, *et al*, 2016) y (Coronado-Hernandez, *et al*, 2017b), respectivamente. Se utilizan soluciones numéricas y otros métodos. Los modelos son más simples de implementar. Los modelos requieren un tiempo de computación bajo.

Desventajas: Generalmente, los modelos matemáticos utilizan un modelo de flujo de pistón para definir una interfaz aire-agua; pero formas más complejas pueden ser utilizadas con esfuerzos adicionales (Tijsseling, Hou, Bozkus, & Laanearu, 2016); (Laanearu, *et al*, 2012). Los modelos descuidan la elasticidad del tubo y del agua (Zhou, Hicks, & Steffler, Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air, 2002); (Izquierdo, *et al*, 1999). La evolución del fenómeno de retorno del aire no se ha implementado.

2.2.2 Modelo Elástico

Ventajas: Los modelos elásticos del agua (EWM) consideran la elasticidad del tubo y del agua (Zhou, *et al*, 2011b), y las formulaciones incluyen los efectos del golpe de ariete. La



resolución numérica se lleva a cabo utilizando el Método de las Características (MOC, por sus siglas en inglés) en combinación con otros métodos (Zhou, Liu, & Karney, 2013); (Zhou, Liu, & Karney, 2013 b). Los modelos son más complejos de implementar que el modelo de caudal constante (RCM, por sus siglas en inglés). Los tiempos de computación son mayores que en el RCM.

Desventajas: Se utiliza un modelo de flujo de pistón para simular una interfaz aire-agua; sin embargo, no se han definido modelos más complejos de dicha interfaz. Los modelos matemáticos de los procesos de llenado y vaciado con válvulas de aire no se han definido en la literatura. La evolución del fenómeno de retroceso del aire no ha sido incorporada en los modelos existentes.

2.2.3 Modelo 2D/3D

Ventajas: Formas complejas de la interfaz aire-agua pueden ser considerarse (Martins, Delgado, Ramos, & Covas, 2017), y su posición de las interfaces aire-agua puede ser modelada de manera adecuada. El fenómeno de retroceso de aire puede ser simulado.

Desventajas: Las escalas de longitud y de tiempo no están definidas en las tuberías que utilizan válvulas de aire durante los procesos de llenado y vaciado. Los modelos requieren un paso de tiempo bajo, lo que implica un alto tiempo de cálculo.

2.3 Fundamentos teóricos del diseño de líneas de conducción de agua potable a gravedad

Los problemas debido a aire atrapado en tuberías de conducción de agua a presión se pueden presentar tanto en sistemas que funcionan a bombeo, como los que lo hacen a gravedad. Sin embargo, es fundamental considerar que los sistemas de conducción de agua potable deben conducir únicamente líquido para que el funcionamiento sea consistente con la teoría del diseño hidráulico de conductos a presión. Esta teoría se fundamenta en las leyes de la conservación de la masa y de la energía (CONAGUA, 2016). Sus fundamentos teóricos parten de la premisa de que el fluido ocupa completamente la sección transversal del conducto. (Cengel & Cimbala, 2014; Mott, 1996).



La capacidad de conducción teórica y la línea piezométrica de una línea de conducción se puede determinar mediante las ecuaciones de conservación de masa (Ecuación 30) y de la energía (Ecuación 31).

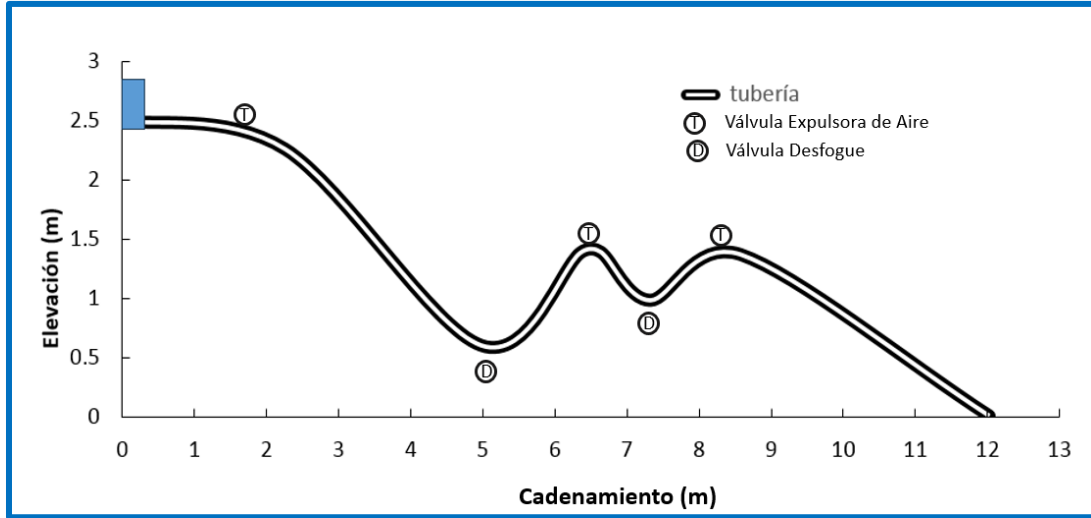


Figura 3 Perfil de una Línea de Conducción Discretizada en Puntos de Interés

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad \text{Ec. 30}$$

$$z_1 + h_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_f - h_a = z_2 + h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 31}$$

Donde V_1 y V_2 son las velocidades del flujo; A_1 y A_2 son las áreas de la sección transversal en la línea de conducción; h_1 y h_2 son las cargas hidráulicas; y z_1 y z_2 , son las elevaciones de la línea de conducción. Los subíndices 1 y 2 representan las ubicaciones de análisis inicial y final, respectivamente; h_f representa las pérdidas por fricción (Ecuación 32) y h_a , las pérdidas por accesorios (Ecuación 33):

$$h_f = K L Q^2 \quad \text{Ec. 32}$$

Donde $K = \frac{10.3n^2}{\phi^3}$, n es el coeficiente de rugosidad del material de la tubería y ϕ es el diámetro de la tubería.



$$h_a = k \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde k , es el coeficiente para el cálculo de pérdidas por accesorios o locales.

En un plano pragmático, su aplicación debe considerar las hipótesis que rigen su uso (CONAGUA, 2016) aplicadas a un volumen de control, que en este caso es la línea de conducción de agua, la cual puede discretizarse en segmentos para su análisis en puntos de interés (Figura 3).

Considerando el perfil de la Figura 3, la conducción funciona a gravedad y tiene un desnivel favorable entre el punto inicial (1), con un tanque almacenamiento que proporciona una carga hidráulica y el punto de descarga (2), que está sujeto a descarga libre (atmósfera). Para cumplir con las hipótesis planteadas, la tubería debe estar presurizada en toda su longitud, por lo que la línea piezométrica debe situarse por arriba del perfil del lomo del tubo en todo momento. Es decir, no debe haber presiones negativas, ya que, de presentarse, el caudal transportado sería inferior al requerido (CONAGUA, 2016).



3. FENÓMENOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

3.1 Llenado en líneas de Conducción.

En las últimas décadas, el análisis de los fenómenos transitorios en líquidos de fase única ha sido ampliamente estudiado por investigadores, y actualmente existen numerosos modelos que representan de manera precisa el comportamiento del agua en cualquier sistema hidráulico. Sin embargo, el flujo transitorio con aire atrapado es mucho más complejo de simular debido a la presencia de dos fluidos (agua y aire) en dos fases (líquido y gas) distintas (Fuentes V. , 2001). Esto implica una mayor complejidad para establecer modelos matemáticos confiables.

Las maniobras de llenado y vaciado son operaciones comunes en las tuberías que presentan aire atrapado. Estas operaciones se repiten periódicamente y deben considerarse para evitar problemas futuros asociados a valores extremos de presión de bolsas de aire. Por esta razón, muchos investigadores han centrado sus esfuerzos en el desarrollo de diferentes modelos para el análisis del aire atrapado en redes de suministro de agua (Zhou, Liu, & Karney, 2013a; (Wang, *et al*, 2016; Laanearu, *et al*, 2012).

Hasta la fecha, los investigadores se han centrado principalmente en los procesos de llenado, desarrollando modelos que han demostrado una gran precisión en comparación con los datos experimentales. En este sentido, los primeros estudios sobre tuberías fueron realizados por (Liou & Hunt, 1996) (Izquierdo, *et al*, 1999), desarrollaron recientemente modelos para analizar el proceso de llenado rápido. Además, se han publicado algunas investigaciones que analizan la influencia de diferentes parámetros a través de investigaciones experimentales de los sistemas (Hou, *et al*, 2014).

Por último, otros estudios se han centrado en técnicas y métodos para resolver el problema de llenado (Wang, *et al*, 2016; Martins, Ramos, & Almeida, 2015; Malekpour & Karney, 2014; Liu, *et al*, 2011; Martins, *et al*, 2010), analizando las consecuencias de la formación de bolsas de aire (Pozos, *et al*, 2010) y la aparición de cavitación en la propagación de fenómenos transitorios (Wang, Shen, & Zhang, 2003) (Guinot, 2001).



Los procesos de vaciado también pueden ser críticos, pero han recibido menos atención por parte de los investigadores. En este sentido, (Laanearu J. , y otros, 2012) desarrollaron un modelo semi-empírico para estimar las pérdidas locales de energía, y (Tijsseling, Hou, Bozkus, & Laanearu, 2016) presentaron un modelo para el proceso de vaciado con aire presurizado en una tubería. Sin embargo, faltan estudios sobre las maniobras de drenaje de agua en aplicaciones reales de ingeniería en sistemas hidráulicos reales.

3.2 Flujo Mixto

La ocurrencia simultánea de flujo en lámina libre y en presión en un mismo conducto se conoce comúnmente como flujo mixto. Este fenómeno se puede encontrar con frecuencia, descontando los colectores pluviales, en túneles y conductos de obras de toma de centrales hidroeléctricas, durante el llenado/vaciado de conductos, colectores de almacenamiento, etc.

El proceso de transición de flujo en lámina libre a flujo en presión puede ser inducido entre otras causas, por la variación de caudales de entrada, bloqueo o reducción de la capacidad del conducto, sumersión de la salida del conducto, operación de elementos de control (compuertas, vertederos, etc.), fallo de estaciones de bombeo, presencia de pozos de caída y falta de aire (Bourdarias & Gerbi, 2007), y puede producir una variación importante de los calados, cargas de presión, velocidades, entrada o expulsión de aire. El resultado de todo ello, puede provocar daños en la infraestructura, levantamiento y expulsión de tapas de los pozos de registro, salida de agua y la posibilidad de inundación de la superficie urbana (Li & McCorquodale, 1999).

Los frentes de onda generados en la transición de flujo en lámina libre a flujo en presión pueden ser de dos tipos: gradual, que consiste de un frente de onda en lámina libre con condiciones de flujo en lámina libre en ambos lados del frente (Figura 4) y brusco, que es un frente de onda a tubo lleno con condiciones de flujo en lámina libre delante y flujo en presión atrás del mismo (Figura 4). Además, estos frentes de onda de presión se pueden clasificar como (Song, Cardle., & Leung, 1983): interfaz positiva (el frente de onda de presión se mueve hacia el flujo en lámina libre), interfaz negativa (el frente de onda de presión se mueve



hacia el flujo en presión), interfaz con cambio de dirección (el frente de onda se mueve de una interface positiva hacia una interface negativa o viceversa).



Figura 4 Flujo mixto en un conducto

Los colectores de una red de alcantarillado son sometidos a ciertas e inestabilidades que representan un reto primero de entender y después de modelar. Estas transiciones se clasifican en (Yen, 1986):

- Inestabilidades de fondo seco. Ocurre cuando el frente de onda avanza sobre fondo seco o sobre capa de agua muy delgada, lo cual, numéricamente puede resultar en calados negativos.
- Inestabilidad del régimen supercrítico al régimen sub-crítico. Ocurre durante un cambio de régimen rápido a régimen lento, el resultado es un resalto hidráulico. Esta inestabilidad es relevante ya que la dirección de la propagación de las ondas es diferente en cada tipo de flujo; además puede producir flujo en presión.
- Inestabilidad de flujo en lámina libre-flujo en presión. Esta inestabilidad se produce por diferentes mecanismos entre ellos: la subida rápida del nivel de agua (debida a cambios bruscos en las condiciones de contorno y por la presencia de aire atrapado), inestabilidad de Helmholtz (se genera cuando el calado tiende a 0.8 veces el diámetro y la diferencia entre la velocidad de las capas de agua y de aire alcanza un cierto valor), inestabilidad geométrica en conductos con sección transversal convergente (ocurre cuando un flujo en régimen permanente, el caudal máximo se presenta para un calado menor al calado máximo. Ello se debe a que cuando el calado aumenta, el perímetro mojado y por lo tanto la fuerza de resistencia al flujo, se incrementa mucho más rápido que las fuerzas inerciales), y presión negativa (debida a la pobre ventilación).
- Inestabilidad del flujo bajo presión. Se produce cuando un transitorio de presión (*water hammer*), con picos de presión elevados, puede provocar la salida de agua a la superficie en forma de géiser.



- Inestabilidad de ondas rodadas. Se produce con flujo en régimen rápido y altos números de Froude. Se debe a que el fluido cerca de la superficie libre se mueve mucho más rápido que el fluido cerca del fondo.

Debido al gran interés por el fenómeno de flujo mixto, se han realizado varias investigaciones experimentales (Capart,, Sillen, & Zech,, 1997); (Cardle & Song, 1988); (Fuamba, 2002); (Li & McCorquodale, 1999); (Trajkovic, Ivetic, Calomino, & D'Ippolito, 1999); (Vasconcelos,, Wright,, & Roe, 2006); (Wiggert, 1972) y de campo a lo largo de los años, en primer lugar para entender y conocer las características de la ocurrencia de flujo mixto y, en segundo lugar, para validar y calibrar modelos numéricos. Trabajos previos (Li & McCorquodale, 1999), (Fuamba, 2002) y (Bousso, Daynou, & Fuamba, 2013) hicieron una revisión del estado del arte y describen entre otras las primeras investigaciones tanto experimentales como numéricas que han tratado sobre la transición de flujo en lámina libre a flujo en presión.

Los esfuerzos por modelar de forma adecuada la ocurrencia de flujo mixto en conductos han dado lugar a diversas aproximaciones. Estas aproximaciones se pueden clasificar de acuerdo con la estrategia de solución, al número de ecuaciones, y al efecto del aire (Aragón-Hernández,, Bladé,, & Gómez, 2011) (Bousso, Daynou, & Fuamba, 2013).

En función de la estrategia de solución, para modelar las discontinuidades en la interface de los dos tipos de flujo, las aproximaciones se pueden clasificar en:

- Métodos de aislamiento del frente de onda (*shock fitting or interfase tracking methods*).
- Métodos directos (*shock capturing methods*). Son muy recomendables, ya que capturan directamente dichas discontinuidades.

En función del número de ecuaciones los métodos se clasifican en:

- Modelos de una única ecuación. Emplean ecuaciones de flujo en lámina libre. Los modelos de una única ecuación se basan en las ecuaciones de Saint Venant en 1D, por lo que requieren de una aproximación para considerar el flujo en presión; el más conocido y utilizado es el método de la ranura de Preissmann. Más recientemente fue propuesto el



método TPA (acrónimo del inglés, *Two-component Pressure Approach*). Ambos son modelos que se encajan en los métodos directos.

- Modelos de dos ecuaciones. Utilizan una ecuación para el flujo en lámina libre y otra ecuación para el flujo en presión.

Finalmente, en función del efecto del aire, los modelos se clasifican en:

- Modelos de una fase. Un único fluido o una mezcla homogénea de agua-aire. Este grupo a su vez se clasifican en modelos que consideran un flujo incompresible (densidad y celeridad de la onda de presión constantes) y uno compresible (densidad y celeridad de la onda de presión variables).
- Modelos de dos fases. Considera una fase para el agua (una única fase para el flujo en lámina libre y una fase equivalente para el flujo bajo presión) y una fase correspondiente al aire (aire sobre la superficie o aire atrapado). La fase de aire se calcula mediante la ecuación de continuidad y con la ecuación de cantidad de movimiento, lo cual implica agregar una capa de transición entre los dos fluidos. Un caso particular es el método de la columna rígida, un modelo de dos fases con dos fluidos distintos (agua y aire).

El método de la ranura de Preissmann fue implementado por primera vez por (Cunge & Wegner, 1964) al estudiar flujo en presión, posteriormente varios autores (Aragón-Hernández, Concha, Bladé, & Gómez, 2009) (Capart., Sillen, & Zech., 1997) (García-Navarro, Priestley, & Alcrudo, 1994) han desarrollado modelos numéricos basados en este método para simular flujo mixto. (Preissmann, 1961) fue quien reconoció la similitud de la forma entre canales abiertos y conductos cerrados y propuso que una ranura hipotética se agregara a la clave de los conductos cerrados, tal que, el flujo en lámina libre y flujo en presión pudieran ser analizados mediante las ecuaciones de Saint Venant (Li & McCorquodale, 1999).

Cuando se emplea el método de la ranura de Preissmann, para resolver las ecuaciones de flujo pueden aparecer cuatro problemas principales asociados con la aproximación misma y el esquema numérico empleado:



- La incapacidad para describir flujos en presión sub-atmosférica.
- Inconsistencias en el balance de masa y del momento asociadas al ancho de la ranura.
- Inestabilidades asociadas al pobre desempeño del esquema numérico cuando el flujo cambia rápidamente de flujo en lámina libre a flujo en presión.
- Inexactitud en la propagación de transitorios hidráulicos asociados con el ancho de la ranura (León A. , Ghidaoui, Schmidt,, & García, 2009).

Para superar estas limitaciones (León A. , Ghidaoui, Schmidt,, & García, 2009) y (Barnett, 2010), propusieron una modificación al método de la ranura de Preissmann introduciendo una transición geométrica gradual entre el conducto y la ranura, desde 0.95 a 1.5 veces el diámetro del conducto. Esta modificación permite que exista continuidad en la velocidad de la onda en lámina libre y en presión en función del ancho de la ranura, en cambio, produce un aumento del área de la sección, tanto en el conducto como en la ranura que conlleva a un almacenamiento extra no real en dicha transición. Recientemente (Kerger, Archambeau, Erpicum, Dewals, & Piroton, 2011) extendieron el método para modelar flujos con presiones sub-atmosféricas y aire atrapado, acoplándolo a un modelo matemático de equilibrio homogéneo.

El método TPA propuesto (Vasconcelos,, Wright,, & Roe, 2006), se formula modificando las ecuaciones de Saint Venant en 1D para permitir flujo en presión (presión sub-atmosférica inclusive), asumiendo un comportamiento elástico de la pared del conducto, lo que permite una relación directa entre el almacenamiento adicional ganado por el flujo en presión y la carga de presión resultante. El término debido a la presión de la ecuación de momento, se compone de la presión hidrostática del flujo en lámina libre y la carga de presión del flujo en presión. Una de las limitaciones de esta aproximación es la presencia de oscilaciones cerca de la interfaz entre el flujo en lámina libre y flujo en presión. Para mantener estas oscilaciones en valores pequeños, se pueden usar valores bajos de la celeridad de la onda de presión, pero esto puede comprometer la aproximación de la simulación (León A. , Ghidaoui, Schmidt,, & García, 2009).

Los modelos de dos ecuaciones, en función de la estrategia de solución se clasifican en:



- Modelos con las ecuaciones completas resueltos mediante el método de las características.
- Métodos de la columna rígida.
- Modelos con las ecuaciones completas, resueltos mediante el método de los volúmenes finitos.

Para tratar las discontinuidades presentes en la interfaz entre los dos tipos de flujo (flujo en lámina libre y flujo en presión) en los modelos de dos ecuaciones que emplean las ecuaciones completas, se pueden abordar mediante métodos de aislamiento del frente de onda o métodos directos. Los métodos de aislamiento del frente de onda tratan cada tipo de flujo de forma separada, y el frente de onda es procesado de forma especial. Así, el flujo en lámina libre o flujo en presión es resuelto usando las ecuaciones y métodos de discretización apropiados para el régimen en particular (generalmente el método de las características o el método de la columna rígida), y la interface es considerada como una condición interna de frontera móvil, lo cual adiciona dos variables desconocidas: la posición y velocidad de la interfaz (Djordjevic, *et al*, 2005; Li & McCorquodale, 1999; Vasconcelos, Wright, & Roe, 2006). La localización del frente de presión se determina en cada paso de tiempo resolviendo un sistema de ecuaciones no lineales basadas en las ecuaciones de continuidad y momento alrededor del frente de presión (Vasconcelos, Wright, & Roe, 2006). En cambio, los métodos directos capturan automáticamente discontinuidades en la solución de ondas de choque y sus interacciones, en cualquier régimen de flujo, como parte integral del dominio de cálculo (Toro, 2001).

Uno de los primeros modelos de dos ecuaciones y clasificado como método de aislamiento del frente onda para modelar flujo mixto fue desarrollado por (Wiggert, 1972); el flujo en lámina libre fue resuelto con el método de las características, mientras que el flujo en presión tratado como flujo pistón con la teoría de la columna rígida. Posteriormente, la mayoría de los modelos emplearon el método de las características para resolver ambos tipos de flujo (Cardle & Song, 1988); (Fuamba, 2002); (Gómez & Achiaga, 2001); (Politano, Odgaard, & Klecan, 2007) (Song, Cardle, & Leung, 1983); (Wiggert, 1972). Generalmente, estos modelos asumen una interfaz vertical. Para superar esta limitación (Politano, Odgaard, & Klecan, 2007) propusieron un modelo numérico para calcular las condiciones de flujo incluso



cuando la energía es insuficiente, esto es, la transición de flujo en lámina libre a flujo en presión es gradual y la interfaz es inclinada.

La simulación de flujo mixto con estos modelos es más compleja, pero si es posible calcular flujo en presión sub-atmosférica. Sin embargo, estos modelos presentan algunas limitaciones, en primer lugar se necesita mantener un frente de onda a tubo lleno, incluso si tiene lugar una transición suave, en segundo, el método de las características aplicado al flujo en lámina libre no puede predecir la propagación de frentes de onda sin excesiva difusión numérica y pueden ocurrir errores importantes al no conservarse la masa (León A. , Ghidaoui, Schmidt,, & García, 2009) (Politano, Odgaard, & Klecan, 2007) (Vasconcelos,, Wright,, & Roe, 2006).

La base de los modelos de dos ecuaciones basados en el principio de la columna rígida aplicado al flujo en presión para estudiar el efecto del aire atrapado, fue propuesta por (Hamam & McCorquodale, 1982). El modelo asume que una burbuja hipotética de aire estacionaria se comprime y expande entre dos columnas rígidas y la velocidad del agua no es permanente ni uniforme. (Li & McCorquodale, 1999) extendieron esta aproximación para permitir la propagación de la burbuja de aire atrapado.

Los modelos de columna rígida ((Hamam & McCorquodale, 1982); (Li & McCorquodale, 1999); (Zhou, Hicks, & Steffler, Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air, 2002) utilizan una ecuación diferencial a partir del equilibrio de momento de una columna rígida aplicada a la fase de agua (flujo incompresible) y ecuaciones de continuidad y momento para considerar la fase de aire y el proceso de transición de flujo de lámina libre a flujo en presión. El uso de estos modelos puede ser restrictivo, en primer lugar, porque se tiene que asumir la ocurrencia de un frente de onda a tubo lleno y, en segundo lugar, la interacción entre el frente de onda en presión y otros frentes de onda presentes en el sistema no puede ser descrito en detalle (Vasconcelos,, Wright,, & Roe, 2006).

Los modelos de dos ecuaciones clasificados como métodos directos emplean el método de los volúmenes finitos. En este sentido, destaca el modelo propuesto por (Bourdarias & Gerbi, 2007); es un modelo escrito en forma conservativa a partir de las ecuaciones de flujo en



lámina libre y flujo en presión, acoplado a través del término de presión con gradiente discontinuo. Posteriormente (Leon, Ghidaoui, Schmidt, & Garcia, 2010) desarrollan el modelo ITM (acrónimo del inglés, *Illinois Transient Model*), un modelo multipropósito para el cálculo de flujos que van desde fondo seco, flujo en lámina libre, flujo mixto, flujo en presión, flujo en presión sub-atmosférica y aire atrapado.

La literatura técnica indica que la transición de flujo en lámina libre a flujo en presión es un fenómeno altamente dinámico, incluso ante cambios lentos en las condiciones de contorno (Song, Cardle., & Leung, 1983), por lo que modelar flujo mixto actualmente aún es un reto ya que implica que el modelo numérico utilizado sea capaz de simular correctamente todos los procesos involucrados, como son frentes de onda suaves y bruscos (Wright, Vasconcelos., Creech, & Lewis, 2008), flujo en régimen lento y rápido (Djordjevic, Prodanovic, Maksimovic, Ivetic, & Savic, 2005), interface de flujo positiva y negativa (Song, Cardle., & Leung, 1983), interface con cambio de dirección, es decir de positiva a negativa o viceversa (Leon, Ghidaoui, Schmidt, & Garcia, 2010), presiones sub-atmosféricas.

Los métodos directos son una opción para modelar flujo mixto, porque permiten capturar discontinuidades en la solución automáticamente (Toro, 2001), conservan la masa y por tanto predicen mejor la velocidad de la onda de presión, lo que es de fundamental importancia, porque dicta el tiempo en el cual ocurre la entrada en presión y requieren menos tiempo de ejecución que el método de las características (León A. , Ghidaoui, Schmidt, & García, 2006).

Por las razones antes mencionadas, a continuación, se describe el desarrollo de cuatro modelos numéricos en 1D para modelar flujo mixto, que emplean métodos directos para tratar con las discontinuidades. Debido al empleo de métodos directos, no es necesario rastrear la propagación del movimiento de la interfaz entre el flujo en lámina libre y el flujo en presión (Li & McCorquodale, 1999). La discontinuidad en la interfaz de ambos flujos puede ser “capturada” mediante ondas de choque o frentes de onda con los métodos directos (Toro, 2001).



Los modelos en cuestión son dos modelos de una única ecuación, el método de la ranura de Preissmann y el método TPA; el método TPA sirve de partida para el desarrollo de dos modelos de dos ecuaciones (ecuaciones de flujo en lámina libre y ecuaciones de flujo en presión); uno que considera flujo incompresible en presión (densidad constante) y otro, flujo compresible en presión (densidad variable).

3.3 Aire Atrapado en Sistemas de Conducción

El aire que entra en las tuberías puede provocar una variedad de problemas. Por ejemplo, el aire acumulado en puntos altos de la tubería puede reducir su sección transversal efectiva, lo que se traduce en un aumento de las pérdidas de carga. El aire promueve la corrosión al proporcionar más oxígeno disponible en las tuberías de hierro. El aire libre puede provocar lecturas incorrectas en los dispositivos de medición. Las vibraciones se deben a la transición de una tubería parcialmente llena a una tubería llena debido a la presencia de bolsas de aire. Grandes cantidades de aire acumulado pueden provocar rechazos que generan vibraciones y daños estructurales. El aire incrementa el consumo de energía de los equipos de bombeo. El aire puede acumularse en cantidades importantes y las bolsas de aire pueden provocar el bloqueo parcial o completo del flujo de agua, reduciendo la capacidad de los sistemas de bombeo y de los sistemas de tuberías por gravedad.

El análisis de transitorios hidráulicos generalmente se basa en la suposición de que no hay aire en los sistemas de conducción de agua. Sin embargo, en algunos sistemas de bombeo puede ocurrir la entrada de aire, ya que las bombas introducen aire mediante el vórtice de succión en cantidades del 5% al 10% del flujo. Cuando se produce presión de vacío en la tubería, el aire puede filtrarse a través de los sellos de las juntas y las válvulas. Del mismo modo, el agua contiene aproximadamente un 2% de aire en volumen y la solubilidad del aire en el agua es proporcional a la presión. El aire disuelto puede formar una fase gaseosa libre en puntos de la tubería donde la presión disminuya o la temperatura aumente.



De igual manera, pueden presentarse bolsas de aire en puntos intermedios o altos a lo largo de la tubería debido a la remoción incompleta del aire durante las operaciones de llenado y desagüe, o a la migración progresiva hacia arriba de las bolsas de aire. Además, si las bolsas de aire ubicadas en puntos altos de la tubería no pueden ser transportadas aguas abajo, puede ocurrir que el flujo se detenga por completo, ya que las pérdidas acumulativas de carga producidas por las bolsas de aire pueden superar la capacidad de la bomba. Los transitorios de presión resultantes con aire arrastrado son considerablemente diferentes de los calculados sin aire en la tubería.

3.3.1 Efecto de las Bolsas de Aire en Conducciones

El aire entrado por diferentes causas es transportado a través de la tubería por la inercia del agua en movimiento y puede acumularse en puntos altos, formando una bolsa de aire que puede aumentar de tamaño si se unen más bolsas de aire o burbujas de aire. Cuando una bolsa de aire alcanza una pendiente descendente, el agua la empuja hacia abajo. Si la bolsa de aire es lo suficientemente grande, el flujo de agua puede no superar la fuerza de flotabilidad de la bolsa, lo que permite que la bolsa permanezca estacionaria en la tubería y la fuerza de fricción se reduzca a cero. Las fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire se muestran en la Figura 3.

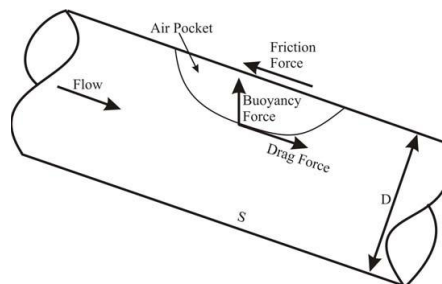


Figura 5 Bolsa de Aire en Tuberías

El fenómeno conocido como "*air binding*" fue introducido por Richards (Richards, *Air binding in large pipe lines flowing under vacuum*, 1957) y se refiere a la captura de aire que reduce la sección transversal de la tubería de manera que impide que la tubería se llene por completo. De esta manera, la tubería se comporta como un flujo en canal abierto debajo de



la bolsa de aire y el gradiente de energía es aproximadamente paralelo a la pendiente de la tubería.

El *air binding* puede ser una fuente de pérdida de carga que reduzca la capacidad del sistema. Aplicando la ecuación de energía entre la parte superior y la parte inferior de cada bolsa de aire, se observa que la pérdida de carga es aproximadamente igual al componente vertical de la longitud de la bolsa, como se muestra en la Figura 3. Richards (Richards, 1962) señaló que es importante reconocer que la mayor pérdida de carga se debe al cambio en la pendiente del gradiente de energía, que pasa de ser el normal de una tubería completamente llena a uno que es aproximadamente paralelo a la pendiente de la tubería.

La reducción de la sección transversal de la tubería debido al aire no es ni siquiera la fuente principal y menos a una fuente importante, de pérdida. Las tuberías con secciones de pendiente descendente en la dirección del flujo pueden acumular aire. En los sistemas de bombeo, la acumulación de aire provoca un aumento del consumo de energía y una reducción del flujo si las bolsas de aire ubicadas en puntos altos de la tubería no pueden ser arrastradas aguas abajo. Puede ocurrir que el flujo se detenga por completo si las pérdidas de carga acumuladas producidas por las bolsas de aire superan la capacidad de la bomba.

La acumulación de aire en las tuberías de gravedad reduce la capacidad. En algunas secciones de tuberías de gravedad, el aire atrapado ha provocado el desbordamiento de los sistemas de purga, ya que la cabeza estática disponible no es lo suficientemente alta como para superar las columnas de agua separadas por el aire que se encuentra en los puntos altos. En la Figura 6 se muestran el efecto de la acumulación de aire.

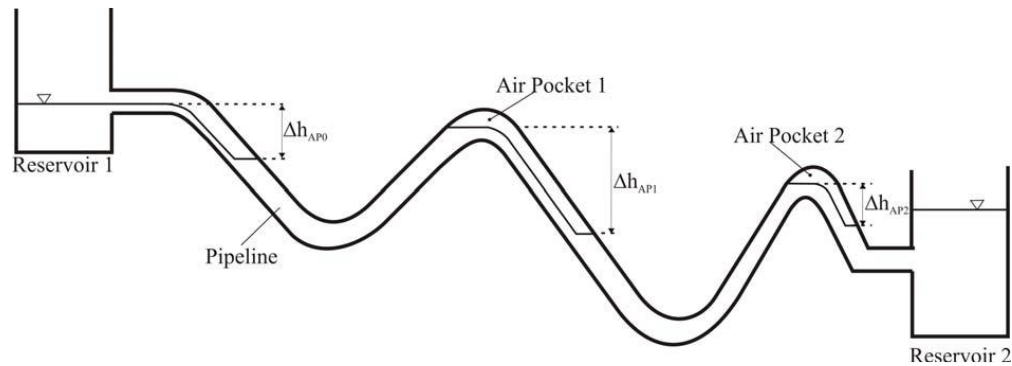


Figura 6 Pérdida de Carga Causada por la Presencia de Aire

Los problemas causados por la reducción de la sección transversal del tubo debido a la presencia de aire atrapado pueden ocurrir con mayor frecuencia de lo que indican los registros. Si las pérdidas de carga son ligeramente menores severas y no provocan derrames en las válvulas de purga o la detención completa del flujo en los sistemas de bombeo, entonces estos problemas pueden pasar desapercibidos. A medida que el aire se acumula en los puntos altos durante el llenado del conducto o por cualquier otra causa de entrada de aire, se pierde más carga. Por lo tanto, las pérdidas de carga totales derivadas de la acumulación de aire pueden evaluarse como la suma de las pérdidas de cargas individuales de cada bolsa de aire.

De la misma manera, se utiliza el método directo de pasos para obtener los perfiles de flujo y las variables necesarias para estimar los volúmenes de aire en las bolsas. Conociendo la ubicación de las bolsas de aire y su volumen, se utiliza un modelo analítico basado en el método de las características para predecir los transitorios hidráulicos causados por el cierre en una estación de bombeo.

3.3.2 Revisión del efecto de aire arrastrado

El aire arrastrado puede acumularse en puntos altos de la tubería y formar bolsas de aire que pueden llegar a ser relativamente grandes. Si la pendiente de la tubería es pronunciada hacia abajo desde el punto más alto, la bolsa de aire tiende a estabilizarse a lo largo de la parte superior de la tubería. Al final de las bolsas de aire suelen producirse un salto hidráulico. La



formación de un salto hidráulico al final de las bolsas de aire en las líneas de suministro de agua es una forma en la que el aire puede ser eliminado y arrastrado por el flujo de agua.

Más allá del salto hidráulico, el aire arrastrado en forma de burbujas puede formar bolsas de aire y si estas son lo suficientemente grandes, la fuerza de arrastre del agua no puede superar la fuerza de flotación. Entonces, la burbuja o la bolsa queda en la tubería, aumentando de tamaño a medida que más burbujas se unen. Las bolsas de aire aumentan aún más su tamaño y reducen su velocidad debido al incremento de la fuerza de flotación. La bolsa de aire puede retroceder con una fuerza tremenda a través del salto hidráulico, llevándose consigo agua, y puede dañar parcial o completamente estructuras hidráulicas, como tanques de presión y tanques de golpe de ariete.

Previamente se investigó (Sailer, 1955) casos de prototipo en el acueducto de San Diego, que atraviesa varios valles amplios mediante sifones largos. El sifón más largo tiene una longitud de 20.12 km. En estas estructuras largas, surgió un problema debido al salto hidráulico en la pierna de entrada. El aire entró y se acumuló en grandes bolsas de aire aguas abajo del salto. Estas bolsas de aire retrocedieron con una fuerza enorme, arrastrando consigo agua y destruyendo la plataforma de hormigón armado en la estructura de entrada del sifón en el Proyecto Belle Fourche en Dakota del Sur, Estados Unidos. Se recomendó (Sailer, 1955) y (Falvey, Air-water flow in hydraulic systems, 1980) que se investigue siempre la posibilidad de retrocesos indeseables en modelos hidráulicos.



4. MODELO EXPERIMENTAL

El modelo experimental en él se realizaron las pruebas representa al modelo teórico de una línea de conducción de agua potable a gravedad, con el objeto de efectuar comparaciones de los resultados.

En primer lugar, se elaboró un diseño con todos los detalles de su geometría y funcionamiento hidráulico, estableciendo caudales y cargas de presión, señalando el equipamiento e instrumentación y previniendo la facilidad de ejecución de experimentos controlados con el aire atrapado.

En segundo lugar, se llevó a cabo la construcción del módulo en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, mediante una estructura metálica de soporte, tubos de acrílico transparente para la zona de pruebas, tubos de PVC para el sistema de alimentación, tanques de almacenamiento de polietileno y tanque de carga constante con la que cuenta el laboratorio. Posteriormente, se instalaron los siguientes instrumentos y equipos: un rotámetro, cuatro piezómetros a lo largo de la línea de conducción, un manómetro, dos válvulas para desfogue de la línea de conducción como se muestra la Figura 7.



Figura 7 Esquema general del Modelo Hidráulico Experimental



Finalmente, se realizó la calibración del módulo, nivelando el tablero de piezómetros, determinando la topografía de la línea de conducción a gravedad, así como los rangos de medición con el rotámetro para el ingreso del gasto al sistema, entre otros. En este capítulo se describen con detalle todas estas actividades y se presentan los resultados obtenidos.

4.1 Geometría del Experimento

De acuerdo con las limitaciones de espacio y capacidad de laboratorio, así como para dar cumplimiento al control de los experimentos y reproducir la geometría del problema planteado teóricamente, se dispuso que el módulo cumpliera con los requisitos indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Geometría del Modelo Experimental.

ELEMENTO	DIMENSION	DESCRIPCION
Longitud de Tubería	12 m	Observar el comportamiento Hidráulico
Diámetro de Tubería	33.5 mm	Observar el Comportamiento de tensión Superficial
Carga Hidráulica en el tanque de abastecimiento	Variable	Satisfacer velocidades de flujo y optimizar la altura del modelo
Angulo de inclinación de la tubería	Variable	Procurar la estabilidad y movimiento del volumen de aire
Válvulas de control	25 mm	Para controlar la salida del caudal en el inicio del modelo
Manómetro	14 psi	Para poder controlar la presión en la entrada del modelo
Fuente de Alimentación		Almacenamiento de Agua en el exterior del laboratorio

El diseño final del módulo experimental se presenta en el esquema de la figura 8, donde se señala su geometría y sus dimensiones, así como algunos detalles de sus elementos.

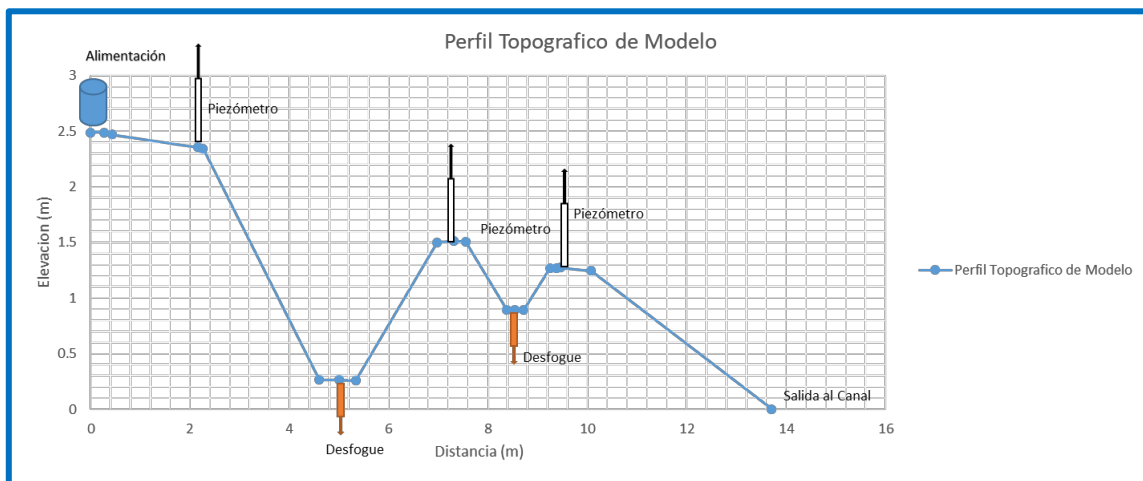


Figura 8 Esquema de Ubicación de Piezómetros y Válvulas de Desfogue



Tabla 3. Configuración de Nodos en Posición y Elevación.

Nodo Inicio	Nodo Final	Posición (m)	Elevación (m)
J	J1	0.000	2.4881
J1	J2	0.267	2.488
J2	J3	0.424	2.47
J3	J4	2.166	2.354
J4	J5	2.262	2.343
J5	J6	4.604	0.264
J6	J7	4.997	0.263
J7	J8	5.336	0.257
J8	J9	6.972	1.501
J9	J10	7.305	1.51
J10	J11	7.546	1.508
J11	J12	8.378	0.892
J12	J13	8.543	0.896
J13	J14	8.716	0.897
J14	J15	9.244	1.265
J15	J16	9.370	1.269
J16	J17	9.451	1.274
J17	J18	10.078	1.245
J18	J19	13.713	0.002

Se trata de un modelo con recirculación de agua, con lo que se logra evitar al máximo variaciones importantes de cargas y gastos hidráulicos y, con ello, se obtiene más control del experimento, específicamente en la estabilización del aire atrapado dentro del flujo de agua.

4.2 Construcción del Modelo

Con base en el diseño se construyó el modelo en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica, ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua. Se utilizó una estructura metálica como soporte de los principales elementos de prueba, por su versatilidad en la instalación y con el fin de que fuera fácilmente removible una vez concluidos los experimentos. Se consideraron también espacios para colocar los accesorios para el registro de datos y operatividad del modelo. En las Figuras 9 y 10 se muestra una vista general del modelo experimental construido.



Figura 9 Ubicación de Modelo Experimental



Figura 10 Ubicación (2) Modelo Experimental



El modelo se alimenta de agua por medio de un tanque elevado de 8 m de altura que se encuentra afuera del laboratorio para poder mantener la carga hidráulica constante en toda la instalación, posterior a esto, nuestro modelo está conectado a una línea de alimentación con un rotámetro con sus respectivas válvulas de seccionamiento para poder controlar el gasto que circula.

Como puede observarse, la tubería de prueba es de acrílico, así como sus conexiones como codos de 90°, 45° y TEE, con un diámetro de 1 ¼" o 32 milímetros. El primer tramo consta de la salida de la alimentación con dos codos de 45° en el cual se ha instalado la válvula antes y después del manómetro para poder controlar la presión de entrada al sistema. Posterior a esto se encuentra toda la tubería en conexión con su topografía sinuosa para tratar de representar cambios tanto en sus características hidráulicas como velocidad y transición entre estados como presión a superficie libre y viceversa (Figuras 11 y 12).



Figura 11 Ubicación de accesorios en Modelo Experimental



Figura 12 Ubicación de Piezómetros

1.1 Instrumentación

Con el propósito de obtener una buena cantidad y calidad de información, fue preciso instrumenta el modelo con elementos de brindaran una medición rápida y confiable de aquellas variables físicas que son necesarias para estudiar el comportamiento de flujo a presión y gravedad.

Los elementos primarios de medición se tratan de aquellos que están en contacto con el agua y registran parámetros hidráulicos, tales como presión, velocidad, gasto y carga piezométrica (ver figuras 13 a 15). Los instrumentos de este modelo se instalaron en él y se describen en la siguiente Tabla 4, a continuación.



Tabla 4. Instrumentación del Modelo Experimental.

Instrumento	Ubicación	Especificación	Objetivo
Rotámetro	Alimentación del Modelo		Medición de Gastos en la entrada del Modelo
Manómetro	Parte Superior del Modelo	Modelo Dixon de 15 PSI	Medición de Presión en la entrada del Modelo
Piezómetro	En las Partes de Cambio de pendiente o crestas del modelo	Tubería de Acrílico de 32 mm	Medición de Cargas Piezométricas en la tubería del Modelo
Recipiente Volumétrico	Final del Modelo	Volumen de 5 l	Medición del Gasto en la Salida del Modelo



Figura 13 Alimentación de Fluido del Modelo Experimental



Figura 14 Válvulas y Manómetro de Entrada del Modelo Experimental



Figura 15 Ubicación de Manómetro de Modelo



4.4 Calibración del Modelo

Las etapas de calibración de los instrumentos del Modelo Experimental se realizaron en las siguientes actividades:

- Nivelación del modelo a base de equipo de medio topográfica
- Determinación de los coeficientes de pérdidas por fricción y pérdidas locales

Enseguida se describe cada una de estas etapas de calibración y los resultados obtenidos.

4.2.1 Nivelación del Modelo Experimental

El modelo fue nivelado con un plano horizontal ubicando un banco de nivel mediante equipo de topografía laser de alta precisión, tomado todas las lecturas de alturas y distancia a lo largo del modelo, como son cambios de dirección por medio de codos de 45 y 90° y longitudes de la tubería. El equipo utilizado para este proceso fue Estación Total marca NIVON 5C con láser para toma de lecturas sin prisma (Figuras 16).



Figura 16 Levantamiento Topográfico con Estacion Lazer (1)



4.5 Determinación de los Coeficientes de Pérdidas por Fricción y Pérdidas Locales en los accesorios del modelo.

Una vez que el modelo fue instrumentado y calibrado, se procedió a realizar pruebas hidráulicas a tubo lleno y flujo permanente, con el fin de medir los coeficientes de pérdidas de carga por fricción y locales de los accesorios y disponer de datos para incorporarlos al modelo teórico (Tabla 5). Como se observa en la Figura 17, se determinó por un lado la energía hidráulica en el tanque de acrílico de prueba para obtener las pérdidas debido a la entrada del modelo y así sucesivamente con cada elemento que está incorporado en el modelo, a continuación, se muestra la relación de accesorios a los cuales se les determino su constante K de pérdida local y el factor de fricción a la tubería de acrílico.



Figura 17 Conexión al Acrílico de Tubería

Tabla 5. Materiales a Utilizar en el Modelo Experimental.

Pieza	Material	Descripción
Conector	PVC	Para ensamblar la alimentación de la carga hidráulica hacia el modelo
TEE	Acrílico	Para la conexión entre la tubería y los piezómetros
Codo 45°	Acrílico	Para la conexión entre la tubería y sus cambios de dirección
Codo 90°	Acrílico	Para la conexión entre la tubería y sus cambios de dirección
Válvula Espera	PVC	Para controlar el gasto que entra al modelo
Tubería	Acrílico	Para determinar el coeficiente de fricción de la tubería



Así, fueron conducidos varios ensayos dentro del rango de condiciones de operación del modelo. Los resultados de las mediciones se muestran a continuación en cada apartado, la carga total del agua en el tanque de carga constante fue medida con una regla que se colocó en el interior del mismo, así como el gasto fue medido a treves del rotámetro y con aforo volumétrico con un recipiente graduado hasta 5 litros, con estos datos obtenidos se calcularon los parámetros ya mencionados.

Con estos registros se procedió a calcular las pérdidas de carga hidráulica del modelo experimental. En primer lugar, se determinó el coeficiente de pérdida local debida a la presencia de la conexión y se obtuvo de la siguiente forma:

$$\frac{P}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_A - H_E - \sum H_L = \frac{P}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde:

$$\frac{P}{\gamma} = \text{Energia de Flujo; tanto en la entra y salida del sismeta} = 0$$

$$Z_{1,2} = \text{Energia Potencial}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \text{Energia Cinetica}$$

$$H_A = \text{Energia Añadida}$$

$$H_E = \text{Energia Extraida}$$

$$\sum H_L = \text{Perdidas x Firccion } (h_f); \text{Perdidas Locales } (h_K)$$

A partir de la ecuación anterior y tomando en cuenta todas las consideraciones se redujo a la siguiente expresión:

$$Z_1 - K \frac{V^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec.34}$$



De dicha expresión se despeja la variable “K” de las pérdidas locales y para obtener la pérdida por fricción se utiliza la siguiente formula proveniente de la ecuación de Manning.

$$h_f = 10.3 n^2 \left(\frac{Q^2}{D^{16/3}} \right) * L \quad \text{Ec. 35}$$

Como se menciona en el párrafo anterior se despeja el valor de n de pérdida por fricción para obtener el dato de la tubería de acrílico.

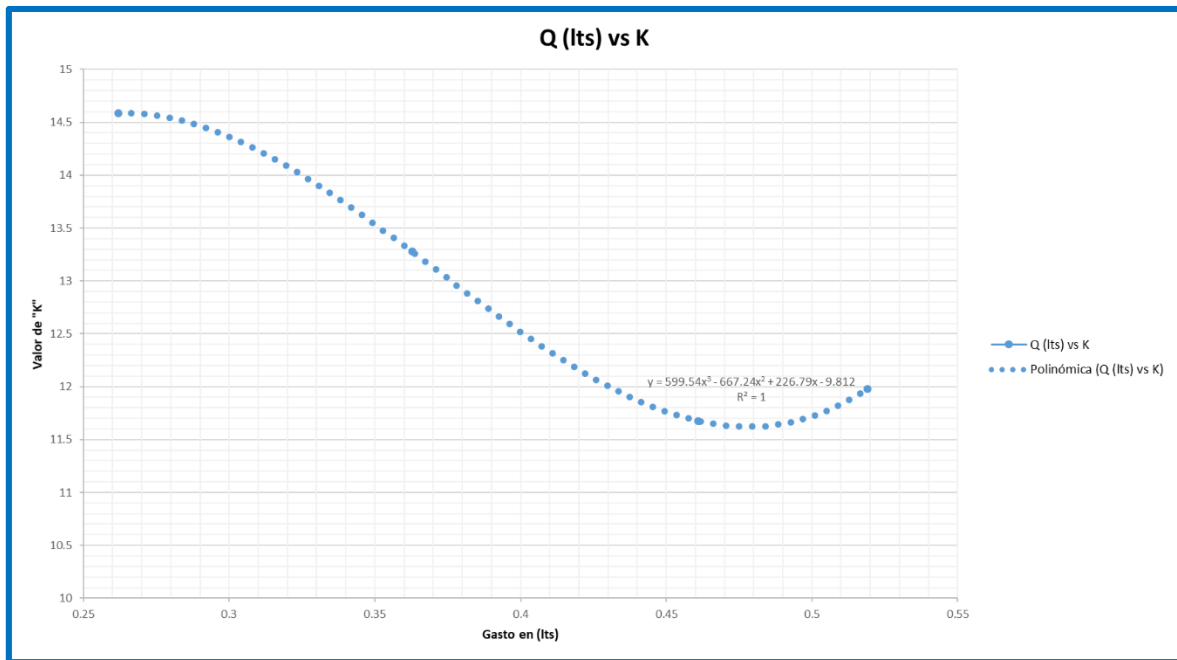
4.5.1 Conexión de Tanque a Tubería

Los resultados del cálculo del coeficiente de pérdida “K” se obtuvo de la energía hidráulica disponible en la sección de estudio y tales mediciones y gráficos se presentan a continuación:



Tabla 6. Medidas para Calculo de "K" de Conexión a tubería.

No. Medicion	Tramite (cm)	Vol (Lts)	Tiempo (Seg)	Q Practico (lts/seg)	Area (m2) Salida	Vel salida (m/s)	h Real (cm)	D (cm)	Area (m)	Vel Teorica (m/s)	Q Teorica (Lts/s)	Q/Qp	Promedio	Cv	K	Promedio K	Promedio Q (lts/seg)
1	25	5	9.77	0.517770727	0.0090792	0.563674339	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.652150383	0.73811288	12.33820242		
2	25	5	9.61	0.520291363	0.0090792	0.573058424	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.592340346	0.78370061	11.90490916		
3	25	5	9.6	0.520833333	0.0090792	0.57365536	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.58602218	0.78660029	11.87806588		
4	25	5	9.5	0.526315789	0.0090792	0.579693838	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.551220945	0.281593293	11.6111702		
5	25	5	9.92	0.504032258	0.0090792	0.555150348	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.708222292	0.69670996	12.75091257		
6	25	5	9.57	0.52246604	0.0090792	0.575453653	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.602433289	0.279533572	11.79770373		11.98012483
7	25	5	9.5	0.526315789	0.0090792	0.579693838	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.551220945	0.281593293	11.6111702		
8	25	5	9.47	0.527983105	0.0090792	0.581530249	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.54006563	0.282483552	11.53164647		
9	25	5	9.76	0.512295082	0.0090792	0.564251174	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.648412255	0.274091832	12.31091198		
10	25	5	9.67	0.517063082	0.0090792	0.569502736	21.6	3.4	0.0090792	2.058620898	0.001869064	1.869063655	3.648412255	0.276642842	12.0665571		
11	20	5	11.4	0.438596491	0.0090792	0.4837078198	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.75821421	0.267678748	12.95636169		
12	20	5	10.7	0.46728972	0.0090792	0.514681445	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.506428878	0.285190442	11.29504347		
13	20	5	10.38	0.481695568	0.0090792	0.53054831	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.506428878	0.285190442	11.29504347		
14	20	5	10.84	0.461254613	0.0090792	0.508034267	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.55207386	0.28150717	11.61888777		
15	20	5	10.98	0.45373406	0.0090792	0.501556599	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.598185895	0.29398244	10.57063571		
16	20	5	10.7	0.46728972	0.0090792	0.514681445	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.506428878	0.285190442	11.29504347		
17	20	5	10.38	0.481695568	0.0090792	0.53054831	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.55207386	0.28150717	11.61888777		
18	20	5	10.84	0.461254613	0.0090792	0.508034267	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.55207386	0.28150717	11.61888777		
19	20	5	10.98	0.45373406	0.0090792	0.501556599	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.598185895	0.29398244	10.57063571		
20	20	5	11.4	0.438596491	0.0090792	0.4837078198	16.6	3.4	0.0090792	1.80469388	0.001638518	1.638518167	3.75821421	0.267678748	12.95636169		
21	15	5	13.37	0.37971578	0.0090792	0.411895137	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.662584174	0.73931288	12.41452283		
22	15	5	13.74	0.36301019	0.0090792	0.400807238	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.763942151	0.76567887	13.16716051		
23	15	5	14.18	0.352609309	0.0090792	0.388370342	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.88447596	0.257434982	14.08915349		
24	15	5	13.65	0.366300366	0.0090792	0.403449924	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.79387508	0.267430626	12.98227107		
25	15	5	13.86	0.360750861	0.0090792	0.397337046	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.796815008	0.263378647	13.4158042		
26	15	5	13.76	0.363372093	0.0090792	0.40022467	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.76942096	0.265292736	13.20853437		
27	15	5	13.65	0.365300566	0.0090792	0.403449924	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.79387508	0.267430626	12.98227107		
28	15	5	13.67	0.365764448	0.0090792	0.402859563	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.744766317	0.263378647	13.4158042		
29	15	5	13.64	0.365568915	0.0090792	0.403745708	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.79387508	0.267430626	12.98227107		
30	15	5	14.38	0.347705146	0.0090792	0.382968808	11.6	3.4	0.0090792	1.508615259	0.001369702	1.369702384	3.76548103	0.26703936	13.02327477		
31	10	5	18.29	0.273373428	0.0090792	0.301098494	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.97913213	0.253584524	14.5178013		
32	10	5	18.97	0.263574064	0.0090792	0.290305296	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.919823491	0.264598339	13.28320836		
33	10	5	19.62	0.254841998	0.0090792	0.280867638	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.945134787	0.255113528	14.3650162		
34	10	5	19.19	0.260552371	0.0090792	0.286977147	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.965282699	0.246661755	15.43600887		
35	10	5	19.11	0.26164319	0.0090792	0.288178517	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.948752078	0.252188829	14.72346688		
36	10	5	18.95	0.263852243	0.0090792	0.290611686	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.951690836	0.255382777	14.33263472		
37	10	5	19.32	0.258799172	0.0090792	0.285046142	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.992144958	0.250491906	14.9372137		
38	10	5	18.64	0.268240943	0.0090792	0.295444821	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.95163468	0.259650023	13.83508971		
39	10	5	19.09	0.261917734	0.0090792	0.288484933	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	3.944619423	0.253509881	14.56002239		
40	10	5	19.85	0.251889169	0.0090792	0.277435338	6.6	3.4	0.0090792	1.137945517	0.001033164	1.033163809	4.101606222	0.243803709	15.8263174		



Grafica 1 Gasto vs "K" de conexión de tuberías

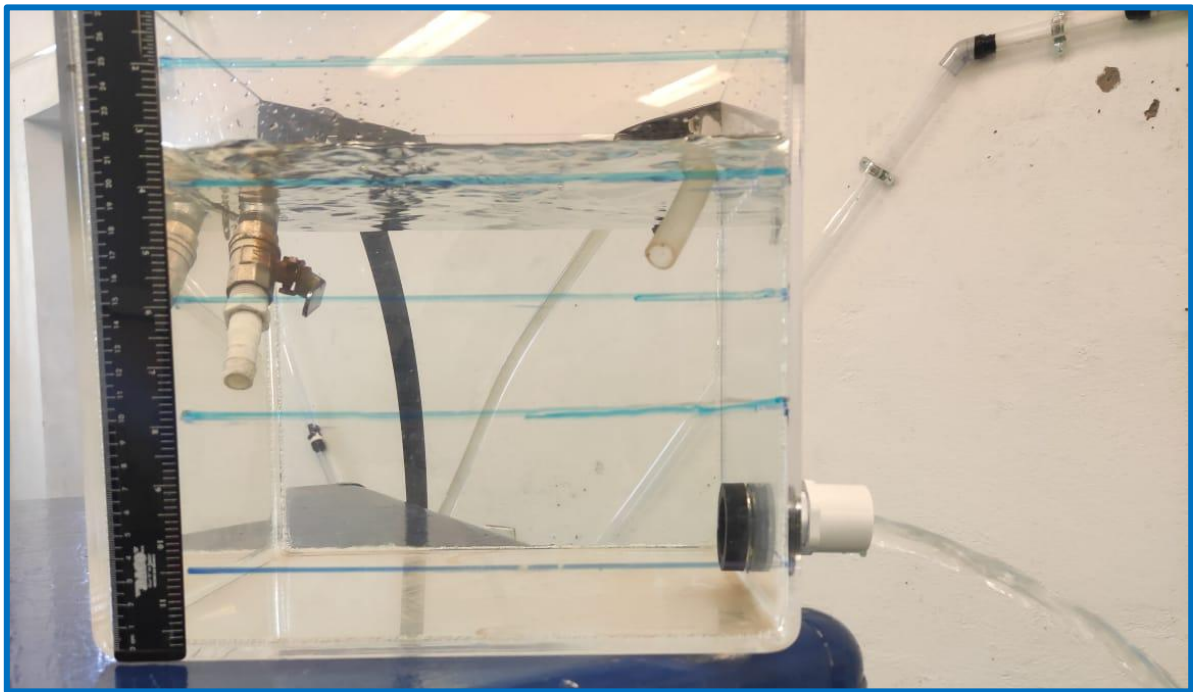
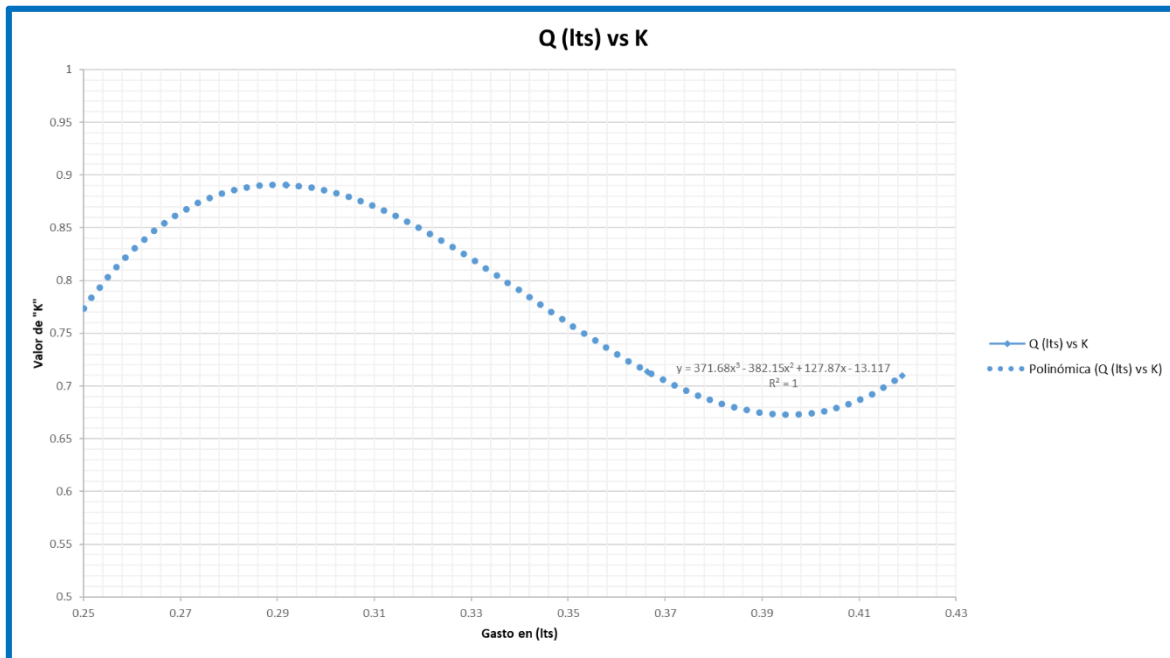


Figura 18 Medición de Conexión de Tanque a Tubería



4.5.2 Conexión de Tanque a Válvula Globo

Los resultados del cálculo del coeficiente de pérdida “K” se obtuvieron de la energía hidráulica disponible en la sección de estudio y tales mediciones y gráficos se presentan a continuación en la Gráfica 2, Figura 19 y Tabla 7.



Grafica 2 Gasto vs "K" de Valvula de Desfogue



Figura 19 Válvula de Desfogue



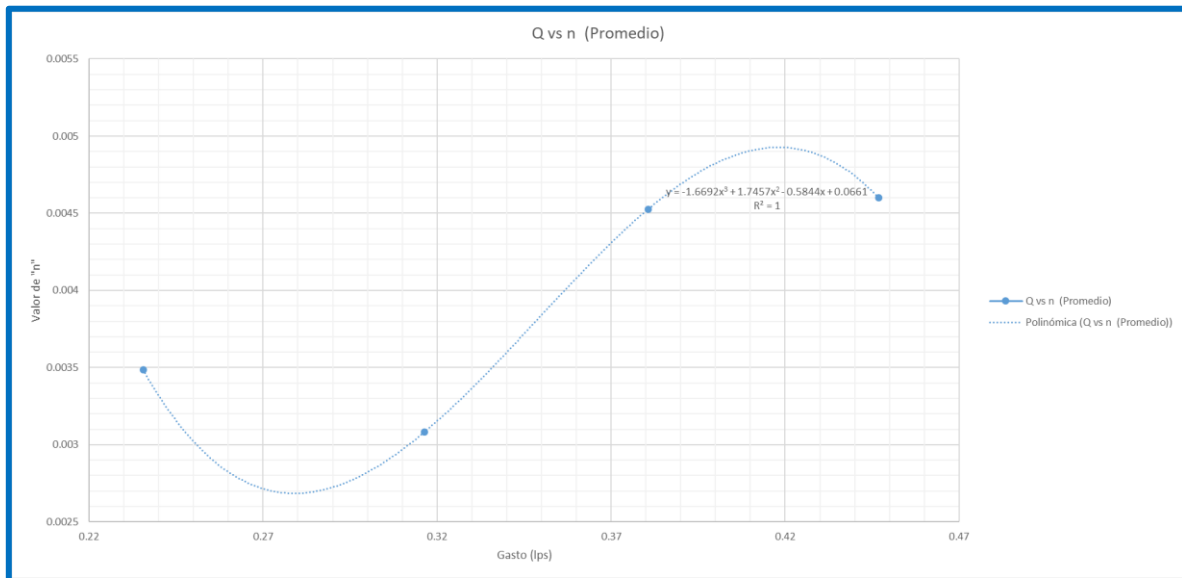
Tabla 7. Medidas para Calculo de "K" de Válvula de Desfogue.

No. Medido	Tirante (cm)	Vol (Lts)	Tiempo (Seg)	Q Practico (lts/seg)	Area (m ²) Salida	Vel salida (m/s)	h Real (cm)	D (cm)	Area (m)	Vel Teorica (m/s)	Q Teorico (m ³ /s)	Q Teorico (Lts/s)	Q ₁ /Q ₂	Promedio	Cv	K	Promedio K	Promedio Q ₁ /Q ₂ (seg)
1	25	5	12.13	0.41220154	0.00265904	1.55018521	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.2592932		0.753021366	0.76544035		
2	25	5	11.85	0.421940928	0.00265904	1.568814377	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.207176624		0.770814276	0.68830635		
3	25	5	12.02	0.415973378	0.00265904	1.546571911	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.23804761		0.759912577	0.73170331		
4	25	5	12.11	0.417881916	0.00265904	1.52714595	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.255694128		0.754265002	0.75772968		
5	25	5	11.95	0.418410042	0.00265904	1.57353595	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.22592837	2.22431251	0.764863947	0.71158849	0.709911962	0.41846797
6	25	5	12.05	0.414837759	0.00265904	1.56047709	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.2442855		0.758020678	0.740552		
7	25	5	11.35	0.440528634	0.00265904	1.656718094	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.11404809		0.804770852	0.5402925		
8	25	5	12.19	0.41071272	0.00265904	1.542555403	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.27054088		0.749314944	0.7810299		
9	25	5	11.95	0.418410042	0.00265904	1.57353595	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.22592837		0.764863947	0.71158849		
10	25	5	11.82	0.423011844	0.00265904	1.590441824	21.6	2.4	0.00452389	2.05620898	0.00931298	0.931298154	2.201388835		0.772770657	0.6745524		
11	20	5	13.29	0.376222774	0.00265904	1.414879536	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.170051728		0.78989797	0.6269212		
12	20	5	13.84	0.361271676	0.00265904	1.356525483	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.259862399		0.752843736	0.76437765		
13	20	5	13.2	0.378787879	0.00265904	1.42452643	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.155380091		0.78945251	0.6049666		
14	20	5	13.95	0.358422939	0.00265904	1.34793904	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.27782373		0.74680734	0.79253049		
15	20	5	13.73	0.3616606	0.00265904	1.36953736	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.21401065	2.22916485	0.75807529	0.73843772	0.71347844	0.3633772
16	20	5	14.02	0.35653381	0.00265904	1.341208013	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.28933673		0.743178125	0.81056518		
17	20	5	13.67	0.36576448	0.00265904	1.375548673	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.232103973		0.762206094	0.71219444		
18	20	5	13.62	0.367107195	0.00265904	1.380598412	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.223939731		0.765004208	0.7087257		
19	20	5	13.76	0.363372093	0.00265904	1.366511625	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.24679961		0.757220735	0.74403423		
20	20	5	13.44	0.37702381	0.00265904	1.399888569	16.6	2.4	0.00452389	1.80469388	0.00816424	0.81642477	2.194594857		0.752498	0.66383599		
21	15	5	16.46	0.30376707	0.00265904	1.142590866	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.246778881		0.75744539	0.74392438		
22	15	5	17.21	0.290528762	0.00265904	1.07606064	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.249101201		0.74244341	0.90464614		
23	15	5	17.5	0.285714286	0.00265904	1.074500021	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.238885126		0.712242578	0.97126103		
24	15	5	17.15	0.29154519	0.00265904	1.09642893	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.240511423		0.72677814	0.89319509		
25	15	5	17.42	0.287026406	0.00265904	1.07943479	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.27775423		0.715513497	0.95272926		
26	15	5	17.65	0.283286119	0.00265904	1.063588093	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.40915957	2.33886388	0.706189525	1.0051989	0.890633844	0.29191592
27	15	5	16.76	0.298292556	0.00265904	1.121942146	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.28767869		0.743800042	0.80807344		
28	15	5	17.05	0.293255132	0.00265904	1.102859259	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.327361794		0.731040769	0.87118533		
29	15	5	16.9	0.295857988	0.00265904	1.112647951	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.30678735		0.732529236	0.83940608		
30	15	5	17.25	0.289855072	0.00265904	1.09072485	11.6	2.4	0.00452389	1.508615259	0.00682481	0.682481465	2.354561053		0.722564934	0.91534158		
31	10	5	21.48	0.23774674	0.00265904	0.875407373	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.11156845		0.763087597	0.68975033		
32	10	5	20.98	0.23832212	0.00265904	0.86627075	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.16007403		0.787621429	0.61199588		
33	10	5	21.35	0.24192037	0.00265904	0.80073722	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.1981719		0.778017184	0.668359		
34	10	5	20.64	0.24248662	0.00265904	0.91194417	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.12501382		0.800595834	0.5601752		
35	10	5	20.8	0.240384615	0.00265904	0.90402646	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.14154803	2.18808222	0.794437381	0.58445772	0.654451388	0.23526913
36	10	5	21.28	0.234662406	0.00265904	0.83854086	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.190855088		0.776517744	0.65943033		
37	10	5	21.41	0.233535731	0.00265904	0.878269517	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.20439723		0.771802783	0.678755		
38	10	5	21.66	0.238404259	0.00265904	0.868132519	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.23089444		0.762884626	0.71818882		
39	10	5	21.62	0.23167345	0.00265904	0.85773885	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.225971089		0.764306036	0.71848685		
40	10	5	21.3	0.244741784	0.00265904	0.828050581	6.6	2.4	0.00452389	1.137945517	0.00514794	0.514794424	2.193024246		0.775388619	0.66154915		



4.5.2 Conexión de Tanque a Tubería (1.8 m)

Los resultados del cálculo del coeficiente de pérdida “n” se obtuvo de la energía hidráulica disponible en la sección de estudio y tales mediciones y gráficos se presentan a continuación (Gráfica 3, Figura 20 y Tabla 8).



Gráfica 3 Gasto vs "n" Fricción en tuberías de Acrílico.

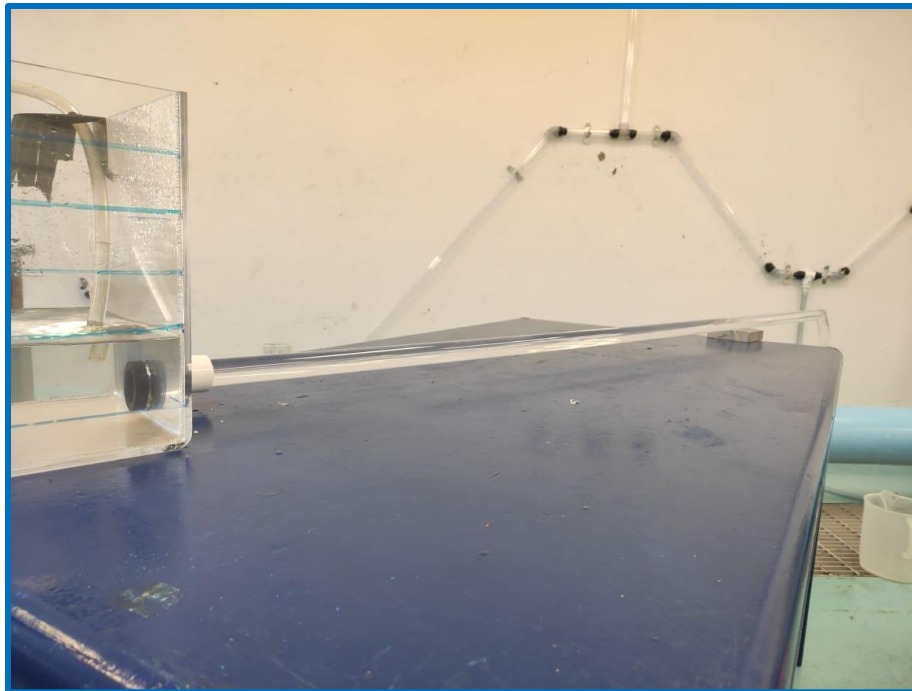


Figura 20 Tubería de Acrílico para Cálculo de Fricción

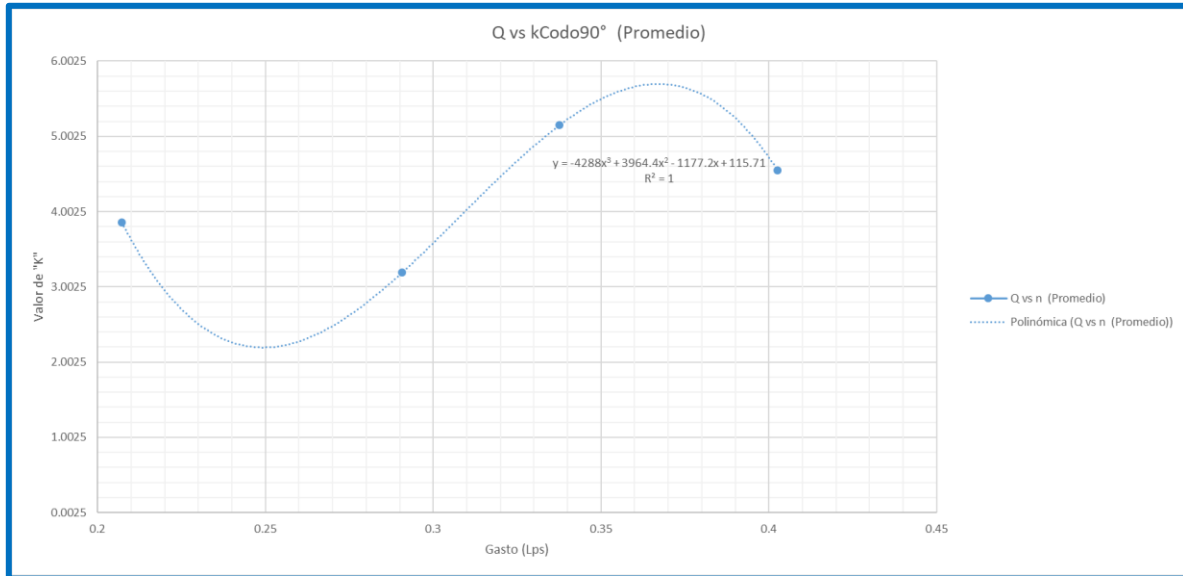
Tabla 8. Medidas para Calculo de "n" en tubería de Acrílico.

Mo.Medici n	Trame (cm)	Vol (lt)	Tempo(Seg)	Q Practico (lt/Seg)	Area (m2) Salda Telescopio	Ve salida Tuberia(m/s)	h Res (cm)	D (cm)	Area (m)	Vel Tuberia(m Teorico) 3/4	Q Teorico(m Teorico) 3/4	Q/Qp	D' Tuberia (mm)	L (m)	V7/2g	Ht	V' u ² /2g	Maning	K (Calculado)	h _t	n (maning)	n (Promedio)	Q(lt/s) Promedio
1	25	5	11.19	0.4682752	0.0000792	0.49714401	0.0049087	0.91026558	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.8395	1.81	0.04027394	0.1726806	0.01234494	130.51367	11.7924974	0.14527095	0.004550891
2	25	5	11.71	0.4698848	0.0000792	0.4702862	0.0049087	0.86984762	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.3775	1.81	0.03854471	0.1774353	0.011278	119.03158	12.047239	0.13580594	0.003915847
3	25	5	10.93	0.4574564	0.0000792	0.503861	0.0049087	0.93192814	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.80377	1.81	0.04425004	0.1773496	0.0129914	136.62656	11.6975621	0.13153885	0.003863828
5	25	5	10.83	0.4616802	0.0000792	0.5095837	0.0049087	0.940527826	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.40839	1.81	0.04508292	0.1709319	0.0131919	139.16419	11.690303	0.13739832	0.003795827
5	25	5	11.21	0.4660303	0.0000792	0.4912696	0.0049087	0.908664577	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.9094	1.81	0.04008138	0.171791862	0.01302083	129.86656	11.8004106	0.1451592	0.004705972
6	25	5	11.39	0.4688456	0.0000792	0.4853522	0.0049087	0.89428396	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.2573	1.81	0.04071684	0.17523816	0.01191511	125.1381	11.884722	0.14157405	0.00517293
7	25	5	11.1	0.4504505	0.0000792	0.4961347	0.0049087	0.917650127	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.4932	1.81	0.04021951	0.1730004	0.0125884	134.79742	11.7562566	0.1469793	0.003955004
8	25	5	10.96	0.4502408	0.0000792	0.5047491	0.0049087	0.9239793	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.40699	1.81	0.04021365	0.1717695	0.012864	138.7973	11.7071282	0.150619	0.003961574
9	25	5	11.64	0.4295526	0.0000792	0.47317192	0.0049087	0.875097725	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.35118	1.81	0.0394927	0.1769703	0.0148979	1204.6773	12.0981387	0.13700793	0.005759449
10	25	5	10.99	0.4549535	0.0000792	0.5011002	0.0049087	0.926884973	21.6	3.4	0.0091	2.096209	0.0019891	1.8896	1.41082	1.81	0.04873833	0.17221697	0.01279842	1351.3889	11.7189130	0.14995586	0.00305666
11	20	5	12.79	0.3609341	0.0000792	0.4835791	0.0049087	0.796399001	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.33075	1.81	0.03231661	0.13373739	0.0094841	967.79721	12.6495004	0.11994606	0.00370088
12	20	5	13.13	0.3600791	0.0000792	0.41942614	0.0049087	0.77474285	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.43075	1.81	0.03674901	0.13352931	0.0098636	946.77971	12.9003808	0.1166684	0.004555783
13	20	5	14.49	0.3456556	0.0000792	0.3306652	0.0049087	0.70261791	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.70443	1.81	0.051863	0.1408137	0.0073822	773.98074	13.6301443	0.1034939	0.00714673
14	20	5	12.71	0.3933903	0.0000792	0.4332808	0.0049087	0.801409627	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.16511	1.81	0.03070028	0.1356972	0.0097763	916.90207	12.9629545	0.1139652	0.00484721
15	20	5	13.27	0.3767905	0.0000792	0.4150012	0.0049087	0.761397878	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.34663	1.81	0.03050133	0.1346967	0.0090763	938.417508	12.8521879	0.1166953	0.00348686
16	20	5	13.06	0.3824849	0.0000792	0.4216762	0.0049087	0.77992424	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.27981	1.81	0.0303079	0.1346621	0.0090273	956.93036	12.85849531	0.1165304	0.00439278
17	20	5	13.05	0.3831476	0.0000792	0.4219935	0.0049087	0.780298989	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.27653	1.81	0.03050133	0.1346967	0.0090763	938.417508	12.8521879	0.1166953	0.00348686
18	20	5	13.34	0.3748129	0.0000792	0.4128245	0.0049087	0.763561946	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.41094	1.81	0.0297195	0.13628405	0.0086828	917.2002	12.3073745	0.1131284	0.00204273
19	20	5	12.54	0.3897408	0.0000792	0.4391952	0.0049087	0.812779032	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.41094	1.81	0.0366289	0.1327161	0.0096939	1037.9607	12.5407795	0.1237490	0.0029606
20	20	5	13.18	0.3793687	0.0000792	0.4178368	0.0049087	0.773281287	16.6	3.4	0.0091	1.8049538	0.001385	1.6382	1.33913	1.81	0.0304418	0.1355382	0.0088946	939.60418	12.93993	0.1155558	0.00467124
21	15	5	15.57	0.3211338	0.0000792	0.3359887	0.0049087	0.66241436	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.2825	1.81	0.02181348	0.0942657	0.0057629	673.8437	14.62075	0.0986603	0.00253931
22	15	5	15.4	0.3246732	0.0000792	0.3376034	0.0049087	0.66142014	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.2168	1.81	0.02279168	0.0947032	0.0051785	688.23142	14.0049927	0.0917657	0.0018784
23	15	5	15.5	0.3225985	0.0000792	0.3352982	0.0049087	0.657153894	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.2608	1.81	0.0220169	0.0898981	0.0054042	679.79387	14.039361	0.0932776	0.002321475
24	15	5	16.07	0.311187	0.0000792	0.3403693	0.0049087	0.63384663	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.4022	1.81	0.0204715	0.0952526	0.0058668	632.03914	14.2138891	0.0850183	0.00063682
25	15	5	16.32	0.3063725	0.0000792	0.3374493	0.0049087	0.62431932	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.47071	1.81	0.0198465	0.09814541	0.005893	612.8236	14.28313	0.0828878	0.00455153
26	15	5	15.91	0.3200792	0.0000792	0.3461405	0.0049087	0.64021016	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.3539	1.81	0.0208916	0.09510892	0.0051668	648.15402	14.1701326	0.0863836	0.00394207
27	15	5	15.66	0.3292488	0.0000792	0.3516612	0.0049087	0.650441658	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.2891	1.81	0.02155492	0.0944658	0.0053821	665.57714	14.0953932	0.0888263	0.00239074
28	15	5	15.21	0.3387101	0.0000792	0.3627094	0.0049087	0.669838494	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.14663	1.81	0.02285824	0.0934176	0.0064817	669.83828	14.7050219	0.0891943	0.00273802
29	15	5	15.61	0.330715	0.0000792	0.3577953	0.0049087	0.65292071	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.27621	1.81	0.02270178	0.0949082	0.0058733	377.65026	14.54748932	0.0923777	0.00116661
30	15	5	16.89	0.2603216	0.0000792	0.3269533	0.0049087	0.60307793	11.6	3.4	0.0091	1.5086156	0.001387	1.369	1.82085	1.81	0.0185371	0.0974629	0.0054039	572.15868	14.4025943	0.0780519	0.00320395
31	10	5	21.8	0.239378	0.0000792	0.2526187	0.0049087	0.49724887	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.30459	1.81	0.0111726	0.05487714	0.003261	343.49491	14.3376518	0.0466367	0.00489760
32	10	5	20.57	0.2407744	0.0000792	0.2677943	0.0049087	0.495381	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.25044	1.81	0.0122947	0.0558023	0.0035233	385.751105	14.4748932	0.0523777	0.00116661
33	10	5	20.79	0.2405004	0.0000792	0.26489136	0.0049087	0.48994067	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.42959	1.81	0.0120701	0.0539639	0.0031854	371.529416	14.45744632	0.0508697	0.00288597
34	10	5	20.96	0.2385482	0.0000792	0.26274991	0.0049087	0.48556932	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.38048	1.81	0.01197571	0.0540478	0.0031854	369.64078	14.4487038	0.0505059	0.00288597
35	10	5	21.03	0.2377539	0.0000792	0.26188365	0.0049087	0.484831705	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.42488	1.81	0.01197571	0.0540478	0.0031854	369.64078	14.4487038	0.0505059	0.00288597
36	10	5	21.24	0.236449	0.0000792	0.25924926	0.0049087	0.479562917	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.42959	1.81	0.01171274	0.0527816	0.0031854	369.64078	14.4487038	0.0505059	0.00288597
37	10	5	21.6	0.2148448	0.0000792	0.25457994	0.0049087	0.471570202	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.46327	1.81	0.01132927	0.0546573	0.0033513	349.8398	14.3688462	0.0476627	0.00494722
38	10	5	21.29	0.2348524	0.0000792	0.25867034	0.0049087	0.478496554	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.3921	1.81	0.0116667	0.0548335	0.0034031	380.1009	14.47419	0.049157	0.00379383
39	10	5	22.05	0.2265737	0.0000792	0.2497571	0.0049087	0.4619632	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.5625	1.81	0.0108767	0.0551236	0.0031788	335.70591	14.2959582	0.0453382	0.00379383
40	10	5	21.06	0.2274169	0.0000792	0.25149532	0.0049087	0.46367161	6.6	3.4	0.0091	1.1794552	0.001382	1.0316	1.35169	1.81	0.01197227	0.0540773	0.0034821	368.00949	14.4440538	0.0503932	0.0031854



4.5.3 Conexión de Tanque-Tubería y Angulo de 90°

Los resultados del cálculo del coeficiente de pérdida “K” se obtuvo de la energía hidráulica disponible en la sección de estudio y tales mediciones y gráficos se presentan a continuación en la Gráfica 4, Figura 21 y Tablas 9 y 10).



Gráfica 4 Gasto vs "K" de Codo de 90 grados de Acrílico.

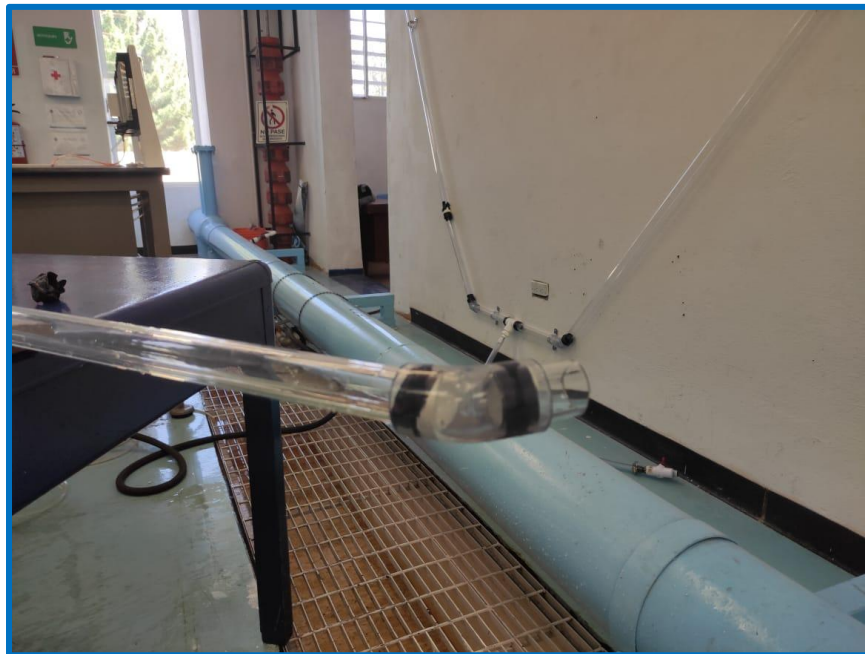


Figura 21 Codo de 90 grados de Acrílico



Tabla 9. Medidas para Calculo de "K" para codo de 90 grados de Acrilico.

No.Medicio n	Tirante (cm)	Vol (Lts)	Tiempo(Seg)	Q Practico (lts/seg)	TELESCOPIO		TUBERIA		CODO 90°		h Real (cm)
					Area (m2) Salida Telescopio	Vel salida Telescopio(m /s)	Area (m2) Salida Tuberia	Vel salida Tuberia(m/s)	Area (m2) Salida Cod 90°	Vel salida Cod 90°(m/s)	
1	25	5	12.72	0.39308176	0.00090792	0.432947442	0.00049087	0.800779588	0.000881413	0.445967692	21.6
2	25	5	12.25	0.40816327	0.00090792	0.449558486	0.00049087	0.831503376	0.000881413	0.463078289	21.6
3	25	5	12.94	0.38639876	0.00090792	0.425586666	0.00049087	0.787165097	0.000881413	0.438385552	21.6
4	25	5	12.39	0.40355125	0.00090792	0.444478729	0.00049087	0.822107858	0.000881413	0.457845766	21.6
5	25	5	11.73	0.42625746	0.00090792	0.469487763	0.00049087	0.868364566	0.000881413	0.483606909	21.6
6	25	5	12.28	0.40716612	0.00090792	0.448460216	0.00049087	0.829472016	0.000881413	0.46194699	21.6
7	25	5	12.33	0.405515	0.00090792	0.446641643	0.00049087	0.826108383	0.000881413	0.460073726	21.6
8	25	5	12.64	0.39556962	0.00090792	0.435687615	0.00049087	0.805847813	0.000881413	0.448790272	21.6
9	25	5	12.44	0.40192926	0.00090792	0.442692239	0.00049087	0.818803566	0.000881413	0.45600555	21.6
10	25	5	12.55	0.39840637	0.00090792	0.438812068	0.00049087	0.811626801	0.000881413	0.452008689	21.6
11	20	5	14.84	0.33692722	0.00090792	0.371097807	0.00049087	0.686382504	0.000881413	0.382258022	16.6
12	20	5	15.45	0.3236246	0.00090792	0.356446049	0.00049087	0.659282612	0.000881413	0.367165634	16.6
13	20	5	14.96	0.3342246	0.00090792	0.368121087	0.00049087	0.680876762	0.000881413	0.379191781	16.6
14	20	5	14.85	0.33670034	0.00090792	0.37084791	0.00049087	0.685920293	0.000881413	0.382000609	16.6
15	20	5	15.05	0.33222591	0.00090792	0.365919698	0.00049087	0.676805074	0.000881413	0.376924189	16.6
16	20	5	14.67	0.34083163	0.00090792	0.375398191	0.00049087	0.694336493	0.000881413	0.386687733	16.6
17	20	5	14.49	0.34506556	0.00090792	0.380061522	0.00049087	0.702961791	0.000881413	0.391491307	16.6
18	20	5	14.61	0.34223135	0.00090792	0.376939867	0.00049087	0.697187978	0.000881413	0.388275773	16.6
19	20	5	14.6	0.34246575	0.00090792	0.377198045	0.00049087	0.697665504	0.000881413	0.388541715	16.6
20	20	5	14.6	0.34246575	0.00090792	0.377198045	0.00049087	0.697665504	0.000881413	0.388541715	16.6
21	15	5	17.56	0.28473804	0.00090792	0.313615687	0.00049087	0.580063574	0.000881413	0.323047212	11.6
22	15	5	17.26	0.28968714	0.00090792	0.319066712	0.00049087	0.590145791	0.000881413	0.328662169	11.6
23	15	5	17.14	0.29171529	0.00090792	0.321300552	0.00049087	0.5942775	0.000881413	0.330963188	11.6
24	15	5	16.78	0.29797378	0.00090792	0.32819377	0.00049087	0.607027197	0.000881413	0.338063709	11.6
25	15	5	17.25	0.28985507	0.00090792	0.319251679	0.00049087	0.590487905	0.000881413	0.328852698	11.6
26	15	5	17.44	0.28669725	0.00090792	0.315773593	0.00049087	0.584054837	0.000881413	0.325270014	11.6
27	15	5	17.53	0.28522533	0.00090792	0.314152393	0.00049087	0.581056267	0.000881413	0.32360006	11.6
28	15	5	16.87	0.29638411	0.00090792	0.326442884	0.00049087	0.603788759	0.000881413	0.336260169	11.6
29	15	5	16.81	0.297442	0.00090792	0.327608058	0.00049087	0.605943864	0.000881413	0.337460383	11.6
30	15	5	17.38	0.287687	0.00090792	0.31686372	0.00049087	0.586071137	0.000881413	0.326392925	11.6
31	10	5	24.28	0.20593081	0.00090792	0.226815958	0.00049087	0.419518796	0.000881413	0.233637111	6.6
32	10	5	24.41	0.20483408	0.00090792	0.225608007	0.00049087	0.41728457	0.000881413	0.232392833	6.6
33	10	5	23.96	0.20868114	0.00090792	0.229845219	0.00049087	0.425121718	0.000881413	0.236757473	6.6
34	10	5	23.92	0.2090301	0.00090792	0.230229576	0.00049087	0.425832624	0.000881413	0.237153388	6.6
35	10	5	24.33	0.2055076	0.00090792	0.226349834	0.00049087	0.418656653	0.000881413	0.233156968	6.6
36	10	5	24.46	0.20441537	0.00090792	0.22514683	0.00049087	0.416431576	0.000881413	0.231917786	6.6
37	10	5	23.49	0.21285653	0.00090792	0.234444081	0.00049087	0.433627772	0.000881413	0.241494638	6.6
38	10	5	24.03	0.20807324	0.00090792	0.229175674	0.00049087	0.423883327	0.000881413	0.236067792	6.6
39	10	5	24.3	0.20576132	0.00090792	0.226629278	0.00049087	0.419173513	0.000881413	0.233444817	6.6
40	10	5	24.15	0.20703934	0.00090792	0.228036913	0.00049087	0.421777075	0.000881413	0.234894784	6.6



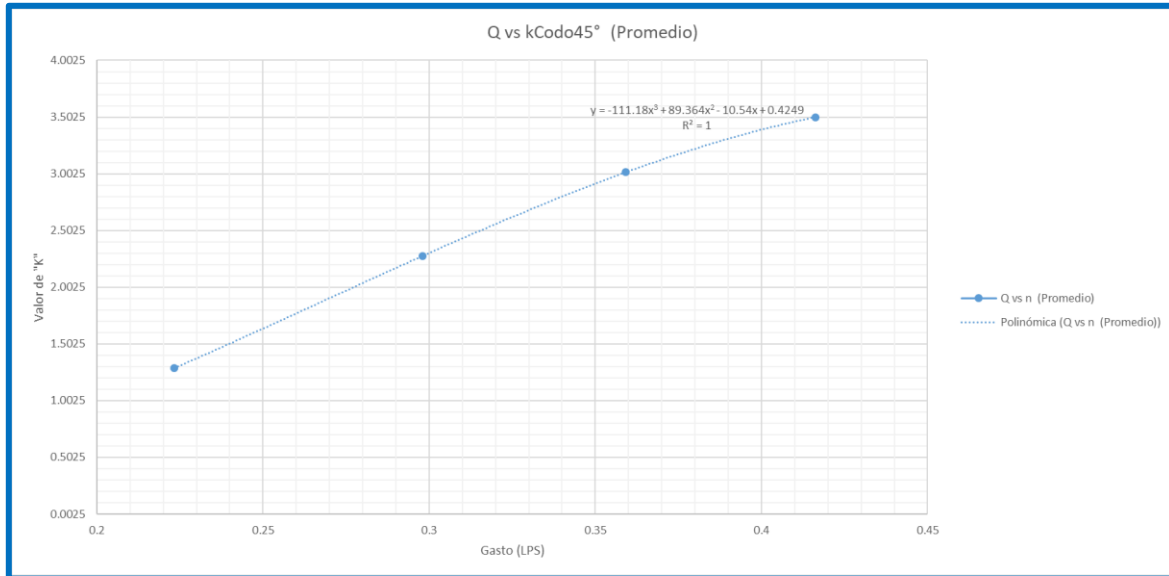
Tabla 10. Medidas para Calculo de "K" para codo de 90 grados de Acrílico (2).

TELESCOPIO															TUBERIA					CODO 90°		
No. Medicio n	D Tubería (mm)	L (m)	V ² /2g	H _t	V ² _{cond} /2g	K (Calculado) Ec Promedio	h _s	10.3 * Q ² * L / D ^(5/3)	n (Manning) Ec. Promedio	h _f	V ² _{cond} /2g	K _{codo90°}	K (Promedio)	Q (lts) Promedio								
1	25	1.81	0.03268338	0.18331662	0.00955369	12.65144819	0.12086807	1008.791791	0.004735723	0.008571658	0.010136961	5.314895323										
2	25	1.81	0.03523944	0.18076096	0.01030086	12.36304441	0.12724996	1087.686115	0.004894482	0.00859012	0.01092974	4.076179345										
3	25	1.81	0.03158149	0.18441851	0.00923116	12.78576347	0.11803307	974.7813452	0.004630942	0.008382005	0.009795203	5.92166311										
4	25	1.81	0.03444757	0.18155243	0.01006939	12.44858028	0.12534955	1063.244511	0.004858745	0.008794328	0.010684136	4.437284427										
5	25	1.81	0.03843308	0.17756692	0.01123439	12.05826679	0.13546729	1186.259594	0.004902919	0.008874284	0.011920267	2.787298889										
6	25	1.81	0.03506747	0.18093253	0.01025059	12.38130872	0.12691571	1082.378179	0.004897197	0.008846912	0.010876403	4.15201852		0.402603888								
7	25	1.81	0.03478364	0.18121636	0.01016762	12.41183467	0.12619885	1073.617567	0.004875449	0.008824563	0.010788371	4.28173487										
8	25	1.81	0.0330984	0.1829016	0.00967501	12.60229692	0.12192735	1021.601717	0.004769808	0.008633352	0.010265683	5.09827243		4.549653002								
9	25	1.81	0.03417122	0.18182878	0.0098986	12.47972784	0.12465052	1054.714706	0.004843344	0.008766453	0.010598423	4.567831447										
10	25	1.81	0.03357482	0.18242518	0.00981427	12.54692411	0.12313894	1036.30671	0.004805113	0.008697254	0.010413448	4.858043641										
11	25	1.81	0.02401228	0.14198772	0.00701904	13.78585462	0.09676348	741.1531523	0.003528015	0.006385706	0.007447563	5.21493185										
12	25	1.81	0.0215356	0.1438464	0.00647573	14.02174598	0.09080101	683.7837796	0.003229882	0.005840086	0.006871081	6.86926916										
13	25	1.81	0.0236286	0.1423714	0.00690689	13.8358086	0.09556237	729.3106826	0.003465003	0.006271656	0.007328563	5.531421069										
14	25	1.81	0.02379955	0.14202005	0.00700959	13.7908367	0.09666284	740.153023	0.00352689	0.006376067	0.007437536	5.241335624										
15	25	1.81	0.02334685	0.14265315	0.00682453	13.8721342	0.09467076	720.6141109	0.00341907	0.006188516	0.007241175	5.771698983		5.153193499								
16	25	1.81	0.02457203	0.14142797	0.00718266	13.71212644	0.09848955	758.430054	0.003620503	0.00655311	0.007621172	4.77424084		0.337676272								
17	25	1.81	0.0251863	0.1408137	0.00736222	13.63031443	0.10034938	777.3900739	0.00372212	0.006737037	0.007811694	4.317537385										
18	25	1.81	0.02477426	0.14122574	0.00724178	13.68528143	0.09910576	764.6722504	0.00365398	0.006613703	0.007683898	4.620867853										
19	25	1.81	0.02480821	0.14119179	0.0072517	13.68076574	0.09920882	765.7201054	0.003659599	0.006623874	0.007694427	4.595416114										
20	25	1.81	0.02480821	0.14119179	0.0072517	13.68076574	0.09920882	765.7201054	0.003659599	0.006623874	0.007694427	4.595416114										
21	25	1.81	0.01714953	0.09885047	0.00501299	14.50734677	0.07272514	529.3302808	0.00269862	0.00488512	0.005319037	3.993244592										
22	25	1.81	0.01775087	0.09824913	0.00518876	14.46718142	0.0750668	547.8910161	0.00272751	0.004932432	0.005505546	3.31420137										
23	25	1.81	0.01800029	0.09799971	0.00526167	14.44862791	0.07602397	555.5896245	0.002740056	0.004959502	0.005582907	3.047916649										
24	25	1.81	0.01878094	0.09721906	0.00548986	14.38411354	0.07896684	579.6847148	0.00280618	0.005069118	0.005825029	2.263182189										
25	25	1.81	0.01777146	0.09822854	0.00519478	14.46569041	0.07514612	548.5264362	0.002776748	0.004934508	0.005511932	3.2947904										
26	25	1.81	0.01738634	0.09861366	0.00508221	14.49233076	0.07365307	536.6397033	0.00270503	0.004900581	0.005392486	3.719992123										
27	25	1.81	0.01720828	0.09879172	0.00503016	14.50372224	0.07295603	531.1435718	0.002700859	0.004888556	0.005337258	3.924699644										
28	25	1.81	0.01858108	0.09741892	0.00543145	14.40150967	0.07822101	573.5160772	0.002783256	0.005037693	0.005763043	2.457071948										
29	25	1.81	0.01871396	0.09728604	0.00547029	14.39000753	0.07871748	577.6174901	0.002794665	0.005058344	0.005804256	2.327639212										
30	25	1.81	0.01750659	0.09849341	0.00511736	14.48430088	0.07412139	540.353213	0.002712728	0.004910037	0.005429783	3.58400979										
31	25	1.81	0.00897024	0.05702976	0.00262209	13.83085814	0.03626581	276.8715916	0.005207664	0.009423872	0.002782176	4.07558156										
32	25	1.81	0.00887494	0.05712506	0.00259424	13.79951302	0.03579924	273.930382	0.00529381	0.009581816	0.002756221	4.26679571										
33	25	1.81	0.00921144	0.05678856	0.0026926	13.90633411	0.0374442	284.316546	0.00904843	0.00900483	0.002856988	3.603769205										
34	25	1.81	0.00924227	0.05675773	0.00270161	13.9159333	0.03759456	285.3682326	0.009901919	0.009001919	0.002866551	3.544765597										
35	25	1.81	0.0089334	0.0570666	0.00261133	13.81884756	0.03608554	275.7347765	0.005240706	0.009485677	0.002770753	4.148829173										
36	25	1.81	0.0088387	0.0571613	0.00258364	13.78735657	0.0362162	272.811615	0.00532717	0.00942178	0.002741379	4.339969719										
37	25	1.81	0.00958374	0.05641626	0.00280143	14.01250123	0.03935502	295.8078728	0.004702746	0.008511969	0.00297246	2.909801232										
38	25	1.81	0.00915785	0.05684425	0.00267694	13.89030476	0.03718174	282.662516	0.00504303	0.009130189	0.002830367	3.706992628										
39	25	1.81	0.00895548	0.05704452	0.00261778	13.82606076	0.03619358	276.6140234	0.005220866	0.00949768	0.00277598	4.104690106										
40	25	1.81	0.00906707	0.05693293	0.00265504	13.86181507	0.03673934	279.8602366	0.005122226	0.00927141	0.00281221	3.88340915		0.207212953								



4.5.4 Conexión de Tanque-Tubería y Angulo de 45°

Los resultados del cálculo del coeficiente de pérdida “K” se obtuvo de la energía hidráulica disponible en la sección de estudio y tales mediciones y gráficos se presentan a continuación (Gráfica 5, Figura 22 y Tablas 11 y 12).



Gráfica 5 Gasto vs "K" de Codo de 45 grados de Acrílico.



Figura 22 Codo de 45 grados de Acrílico.



Tabla 11. Medidas para Calculo de "K" para codo de 45 grados de acrílico.

No. Medicio n	Tirante (cm)	Vol (Lts)	Tiempo(Seg)	Q Practico (lts/seg)	TELESCOPIO		TUBERIA		CODO 45°		h Real (cm)
					Area (m2) Salida Telescopio	Vel salida Telescopio(m /s)	Area (m2) Salida Tubería	Vel salida Tubería(m/s)	Area (m2) Salida Cod 45°	Vel salida Cod 45°(m/s)	
1	25	5	11.69	0.427716	0.00090792	0.471094222	0.00049087	0.871335873	0.000881413	0.48526168	21.6
2	25	5	12.18	0.41050903	0.00090792	0.452142156	0.00049087	0.836282131	0.000881413	0.465739659	21.6
3	25	5	12.41	0.40290089	0.00090792	0.443762406	0.00049087	0.820782946	0.000881413	0.4571079	21.6
4	25	5	12.53	0.3990423	0.00090792	0.439512487	0.00049087	0.812922295	0.000881413	0.452730171	21.6
5	25	5	11.67	0.42844901	0.00090792	0.471901582	0.00049087	0.872829165	0.000881413	0.48609332	21.6
6	25	5	11.9	0.42016807	0.00090792	0.462780795	0.00049087	0.855959358	0.000881413	0.476698239	21.6
7	25	5	11.96	0.4180602	0.00090792	0.460459152	0.00049087	0.851665247	0.000881413	0.474306776	21.6
8	25	5	12.12	0.41254125	0.00090792	0.454380483	0.00049087	0.840422142	0.000881413	0.468045301	21.6
9	25	5	11.9	0.42016807	0.00090792	0.462780795	0.00049087	0.855959358	0.000881413	0.476698239	21.6
10	25	5	11.82	0.42301184	0.00090792	0.465912983	0.00049087	0.861752653	0.000881413	0.479924623	21.6
11	20	5	14.83	0.33715442	0.00090792	0.371348042	0.00049087	0.686845338	0.000881413	0.382515782	16.6
12	20	5	13.81	0.36205648	0.00090792	0.39877563	0.00049087	0.737575406	0.000881413	0.410768215	16.6
13	20	5	14.28	0.35014006	0.00090792	0.385650662	0.00049087	0.713299465	0.000881413	0.397248532	16.6
14	20	5	14.22	0.35161744	0.00090792	0.38727788	0.00049087	0.716309167	0.000881413	0.398924687	16.6
15	20	5	13.49	0.37064492	0.00090792	0.408235097	0.00049087	0.755071635	0.000881413	0.42051216	16.6
16	20	5	14.24	0.35111236	0.00090792	0.386733951	0.00049087	0.715303115	0.000881413	0.398364399	16.6
17	20	5	14.14	0.35360679	0.00090792	0.389468986	0.00049087	0.720361836	0.000881413	0.401181686	16.6
18	20	5	13.37	0.37397158	0.00090792	0.411899137	0.00049087	0.761848643	0.000881413	0.424286391	16.6
19	20	5	13.63	0.36683786	0.00090792	0.404041926	0.00049087	0.747315947	0.000881413	0.416192887	16.6
20	20	5	13.37	0.37397158	0.00090792	0.411899137	0.00049087	0.761848643	0.000881413	0.424286391	16.6
21	15	5	16.26	0.30750308	0.00090792	0.338689511	0.00049087	0.62644012	0.000881413	0.348875095	11.6
22	15	5	16.99	0.29429076	0.00090792	0.324137225	0.00049087	0.599524212	0.000881413	0.33388517	11.6
23	15	5	17.2	0.29069767	0.00090792	0.320179736	0.00049087	0.592204439	0.000881413	0.329808665	11.6
24	15	5	17.39	0.28752156	0.00090792	0.31668151	0.00049087	0.585734121	0.000881413	0.326205235	11.6
25	15	5	16.88	0.29620853	0.00090792	0.326249494	0.00049087	0.603431064	0.000881413	0.336060962	11.6
26	15	5	16.82	0.29726516	0.00090792	0.327413285	0.00049087	0.605583612	0.000881413	0.337259753	11.6
27	15	5	16.99	0.29429076	0.00090792	0.324137225	0.00049087	0.599524212	0.000881413	0.33388517	11.6
28	15	5	16.65	0.3003003	0.00090792	0.330756244	0.00049087	0.611766748	0.000881413	0.340703246	11.6
29	15	5	16.17	0.30921459	0.00090792	0.340574611	0.00049087	0.6299268	0.000881413	0.350816886	11.6
30	15	5	16.46	0.30376671	0.00090792	0.334574208	0.00049087	0.618828454	0.000881413	0.344636029	11.6
31	10	5	23.02	0.21720243	0.00090792	0.239230732	0.00049087	0.442481162	0.000881413	0.246425241	6.6
32	10	5	22.52	0.22202487	0.00090792	0.244542249	0.00049087	0.452305344	0.000881413	0.251896494	6.6
33	10	5	22.36	0.2236136	0.00090792	0.246292104	0.00049087	0.455541876	0.000881413	0.253698973	6.6
34	10	5	21.6	0.23148148	0.00090792	0.254957938	0.00049087	0.471570202	0.000881413	0.262625419	6.6
35	10	5	22.45	0.22271715	0.00090792	0.245304742	0.00049087	0.453715651	0.000881413	0.252681917	6.6
36	10	5	22.47	0.22251891	0.00090792	0.245086402	0.00049087	0.453311809	0.000881413	0.252457011	6.6
37	10	5	22.49	0.22232103	0.00090792	0.244868451	0.00049087	0.452908686	0.000881413	0.252232505	6.6
38	10	5	22.46	0.22261799	0.00090792	0.245195523	0.00049087	0.45351364	0.000881413	0.252569414	6.6
39	10	5	21.93	0.22799818	0.00090792	0.251121361	0.00049087	0.46447407	0.000881413	0.258673463	6.6
40	10	5	22.63	0.22094565	0.00090792	0.243353577	0.00049087	0.450106777	0.000881413	0.250672074	6.6



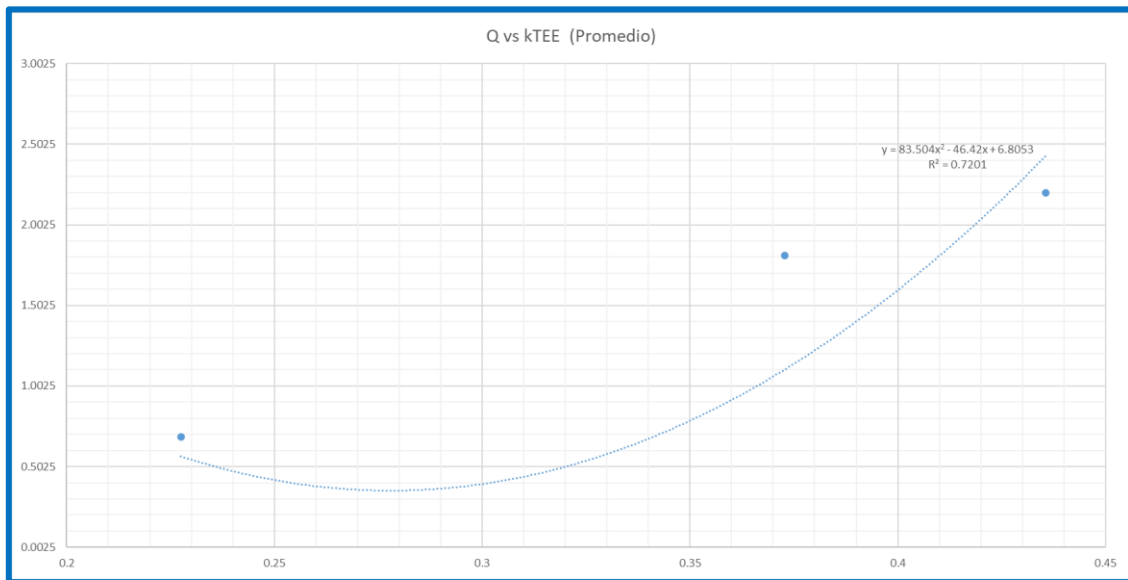
Tabla 12. Medidas para Calculo de "K" para codo de 90 grados de PVC(2).

No. Medición	D Tubería (mm)	L (m)	V ² /2g	H _L	TELÉSCOPIO		TUBERÍA		CODO 45°		K (Promedio)	Q (lts) Promedio
					K (Calculado) Ec Promedio	h _{tc}	10.3 * Q ⁴ / D ^{5.483}	n (Manning) Ec. Promedio	h _L	V ² / 2g	K _{calculado}	
1	25	1.81	0.03869654	0.17730346	12.03625057	0.1361469	1194.391598	0.004893303	0.008856878	0.012001983	2.691194752	
2	25	1.81	0.03564566	0.18035434	0.0104196	0.1283758	1100.22418	0.004907853	0.008883214	0.01105573	3.89808313	
3	25	1.81	0.03433663	0.18166337	0.01003696	0.12506901	1059.820215	0.004852741	0.008783461	0.010649726	4.489401871	
4	25	1.81	0.03368209	0.18231791	0.00984563	0.12341118	1033.617592	0.004812484	0.008710597	0.010446718	4.804966587	
5	25	1.81	0.03882929	0.17717071	12.02534911	0.13649023	1198.488993	0.004887835	0.008846982	0.012043156	2.643285332	
6	25	1.81	0.03734283	0.17865717	12.0109157	0.13267628	1152.608556	0.004925553	0.008915251	0.011582121	3.200245635	0.416256666
7	25	1.81	0.03696991	0.1790309	12.18955282	0.13275584	1141.077993	0.004927081	0.008918017	0.011466204	3.347842272	
8	25	1.81	0.03599946	0.18000054	0.01052302	0.12926977	1111.144452	0.004916684	0.008899198	0.01165464	3.746514717	
9	25	1.81	0.03734283	0.17865717	12.15462718	0.13267628	1152.608556	0.004925553	0.008915251	0.011582121	3.200245635	
10	25	1.81	0.03785003	0.17814097	12.10876028	0.13397085	1168.263502	0.004918428	0.00890355	0.011739431	3.004980808	
11	25	1.81	0.02404467	0.14195533	0.00702851	0.09686421	742.1530215	0.003533353	0.006395369	0.007457611	5.18875915	
12	25	1.81	0.02772777	0.1382723	0.0081051	0.10770015	855.3510763	0.004128636	0.00747283	0.008599925	2.685990471	
13	25	1.81	0.02593252	0.14006748	0.00758035	0.10256274	800.4276085	0.003844683	0.006958877	0.008043139	3.79752964	
14	25	1.81	0.02615183	0.13984817	0.00764445	0.10320407	807.19148	0.00388035	0.007023434	0.008111157	3.651842751	
15	25	1.81	0.02905878	0.13694122	0.00849418	0.11136105	896.9161884	0.004322407	0.007823556	0.009012766	1.970163477	0.359112471
16	25	1.81	0.02607842	0.13992158	0.00762299	0.11041831	804.9256804	0.003868434	0.007001865	0.008083889	3.700350605	
17	25	1.81	0.02644858	0.13955142	0.0077312	0.10406555	816.3510763	0.003928268	0.007110164	0.008203198	3.49102659	
18	25	1.81	0.02958274	0.13641726	0.00864734	0.11277259	913.0886565	0.004393437	0.007952121	0.009175277	1.71030834	
19	25	1.81	0.02846489	0.13753511	0.00832059	0.10974169	878.5855381	0.004338144	0.007671041	0.008828569	2.279235196	
20	25	1.81	0.02958274	0.13641726	0.00864734	0.11277259	913.0886565	0.004393437	0.007952121	0.009175277	1.71030834	
21	25	1.81	0.0200139	0.0959861	0.00584661	0.08341029	617.3545872	0.002930156	0.00530583	0.006203559	1.174283799	
22	25	1.81	0.01831954	0.09766046	0.00535499	0.07723709	565.4432243	0.002762416	0.004999973	0.005681922	2.717989365	
23	25	1.81	0.01787493	0.09812507	0.00522503	0.0754391	551.7201787	0.002732254	0.00494538	0.005544024	3.181043051	
24	25	1.81	0.01748647	0.09851353	0.00511148	0.07404314	539.7300494	0.002711813	0.004908381	0.00542354	3.60887247	
25	25	1.81	0.01855907	0.09744093	0.00542501	0.07813856	572.836757	0.002781419	0.005034368	0.005756217	2.478710956	
26	25	1.81	0.01869172	0.09730828	0.00546378	0.07863452	576.9308721	0.002792718	0.005054819	0.005797357	2.349163408	0.298105913
27	25	1.81	0.01831954	0.09766046	0.00535499	0.07723709	565.4432243	0.002762416	0.004999973	0.005681922	2.717989365	
28	25	1.81	0.01907536	0.09692464	0.00557593	0.08005616	588.7721872	0.002828326	0.005119271	0.005916346	1.985898479	
29	25	1.81	0.02022466	0.09577534	0.00591188	0.08420289	624.2459339	0.002957634	0.005353317	0.006272808	0.991443109	
30	25	1.81	0.01951828	0.09648172	0.0057054	0.08167398	602.443191	0.002874431	0.005202719	0.00605372	1.586631251	
31	25	1.81	0.00997908	0.05602092	0.00291699	0.04116595	308.0102175	0.0041942	0.007999151	0.003095076	2.215072356	
32	25	1.81	0.01042712	0.05557288	0.00304796	0.04331511	321.8392368	0.004134087	0.007482697	0.003234039	1.476503229	
33	25	1.81	0.01057688	0.05542312	0.00309173	0.04402938	326.4616442	0.00406596	0.00732434	0.003280488	1.240516639	
34	25	1.81	0.01133427	0.05466573	0.00331313	0.04760677	349.8390296	0.003659109	0.006622987	0.003515398	0.124159346	
35	25	1.81	0.01049225	0.05505775	0.00306699	0.04243361	323.849381	0.004095572	0.007412986	0.003254238	1.373230141	
36	25	1.81	0.01047358	0.05552642	0.00306154	0.04365688	323.2731367	0.004106539	0.007433835	0.003248448	1.402732385	
37	25	1.81	0.01045496	0.05554504	0.00305609	0.0444802	322.698429	0.004117536	0.00745274	0.003242673	1.42238165	
38	25	1.81	0.01048291	0.05557709	0.00306426	0.04581339	323.5610664	0.004101052	0.007422904	0.003251341	1.387980814	
39	25	1.81	0.01099573	0.05500427	0.00321417	0.047246972	339.3895755	0.004101052	0.007422904	0.003251341	1.387980814	
40	25	1.81	0.010326	0.055674	0.0030184	0.04283167	318.7180459	0.004195341	0.007593568	0.003202675	1.638868781	



4.5.5 Conexión de Tanque-Tubería y TEE

Los resultados del cálculo del coeficiente de pérdida “K” se obtuvo de la energía hidráulica disponible en la sección de estudio y tales mediciones y gráficos se presentan a continuación (Gráfica 6, Figura 23 y Tablas 13 y 14).



Gráfica 6 Gasto vs "K" de TEE de Acrílico.

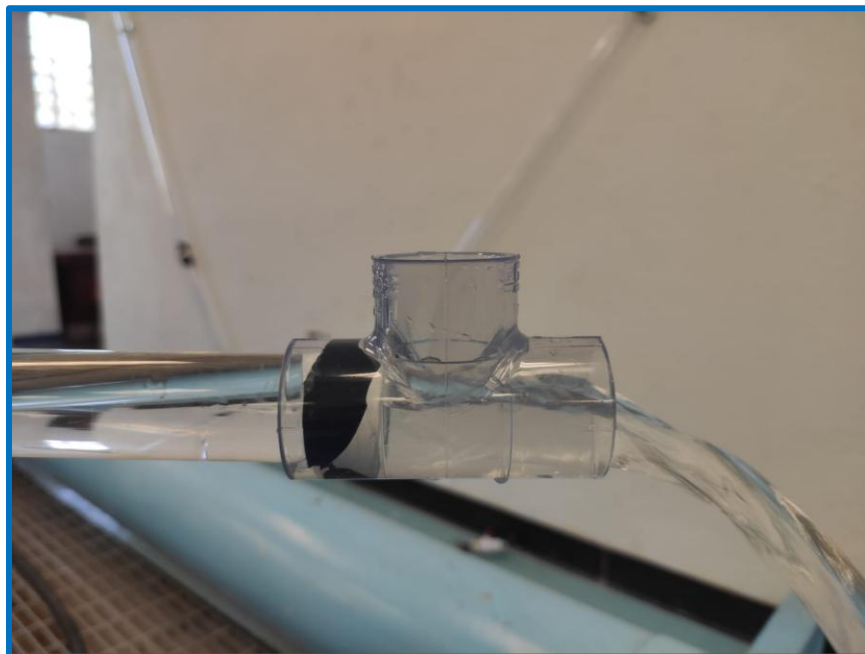


Figura 23 Tee de Acrílico.



Tabla 13. Medidas para Calculo de "K" para TEE de acrílico.

Vol (Lts)	Tiempo(Seg)	Q Practico (lts/seg)	TELESCOPIO		TUBERIA		TEE		h Real (cm)
			Area (m2) Salida Telescopio	Vel salida Telescopio(m /s)	Area (m2) Salida Tuberia	Vel salida Tuberia(m/s)	Area (m2) Salida TEE	Vel salida TEE(m/s)	
5	11.37	0.43975374	0.00090792	0.484352811	0.00049087	0.895858958	0.000881413	0.498919001	21.6
5	11.29	0.4428698	0.00090792	0.487784894	0.00049087	0.90220694	0.000881413	0.5024543	21.6
5	11.45	0.43668122	0.00090792	0.480968686	0.00049087	0.889599682	0.000881413	0.495433104	21.6
5	11.36	0.44014085	0.00090792	0.484779178	0.00049087	0.896647567	0.000881413	0.49935819	21.6
5	11.17	0.44762757	0.00090792	0.493025198	0.00049087	0.911899405	0.000881413	0.507852197	21.6
5	11.71	0.42698548	0.00090792	0.470289621	0.00049087	0.869847682	0.000881413	0.484432882	21.6
5	11.6	0.43103448	0.00090792	0.474749263	0.00049087	0.878096238	0.000881413	0.489026642	21.6
5	11.49	0.43516101	0.00090792	0.479294296	0.00049087	0.886502729	0.000881413	0.493708359	21.6
5	11.8	0.42372881	0.00090792	0.466702666	0.00049087	0.863213251	0.000881413	0.480738055	21.6
5	11.59	0.43140638	0.00090792	0.475158883	0.00049087	0.87885387	0.000881413	0.48944858	21.6
5	13.2	0.37878788	0.00090792	0.417203898	0.00049087	0.77166033	0.000881413	0.429750685	16.6
5	13.32	0.37537538	0.00090792	0.413445305	0.00049087	0.764708435	0.000881413	0.425879057	16.6
5	13.8	0.36231884	0.00090792	0.399064598	0.00049087	0.738109881	0.000881413	0.411065873	16.6
5	13.3	0.37593985	0.00090792	0.414067027	0.00049087	0.765858373	0.000881413	0.426519477	16.6
5	13.24	0.3776435	0.00090792	0.415943463	0.00049087	0.76932903	0.000881413	0.428452345	16.6
5	13.37	0.37397158	0.00090792	0.411899137	0.00049087	0.761848643	0.000881413	0.424286391	16.6
5	13.6	0.36764706	0.00090792	0.404933195	0.00049087	0.748964438	0.000881413	0.417110959	16.6
5	13.61	0.36737693	0.00090792	0.404635669	0.00049087	0.748414134	0.000881413	0.416804485	16.6
5	13.28	0.37650602	0.00090792	0.414690622	0.00049087	0.767011774	0.000881413	0.427161826	16.6
5	13.43	0.37230082	0.00090792	0.410058932	0.00049087	0.758445001	0.000881413	0.422390845	16.6
5	15.42	0.32425422	0.00090792	0.357139524	0.00049087	0.660565263	0.000881413	0.367879964	11.6
5	15.44	0.3238342	0.00090792	0.356676908	0.00049087	0.659709609	0.000881413	0.367403435	11.6
5	15.48	0.32299742	0.00090792	0.355755262	0.00049087	0.658004933	0.000881413	0.366454073	11.6
5	15.61	0.3203075	0.00090792	0.352792534	0.00049087	0.652525071	0.000881413	0.363402245	11.6
5	15.42	0.32425422	0.00090792	0.357139524	0.00049087	0.660565263	0.000881413	0.367879964	11.6
5	15.86	0.31525851	0.00090792	0.347231492	0.00049087	0.642239367	0.000881413	0.357673962	11.6
5	16.18	0.30902349	0.00090792	0.34036412	0.00049087	0.629537476	0.000881413	0.350600064	11.6
5	15.48	0.32299742	0.00090792	0.355755262	0.00049087	0.658004933	0.000881413	0.366454073	11.6
5	15.68	0.31887755	0.00090792	0.351217567	0.00049087	0.649612013	0.000881413	0.361779913	11.6
5	15.54	0.32175032	0.00090792	0.35438169	0.00049087	0.655464373	0.000881413	0.365039192	11.6
5	21.8	0.2293578	0.00090792	0.252618874	0.00049087	0.46724387	0.000881413	0.260216011	6.6
5	21.91	0.2282063	0.00090792	0.251350591	0.00049087	0.464898054	0.000881413	0.258909587	6.6
5	21.88	0.2285192	0.00090792	0.251695222	0.00049087	0.465535483	0.000881413	0.259264581	6.6
5	21.59	0.2315887	0.00090792	0.255076029	0.00049087	0.471788622	0.000881413	0.262747061	6.6
5	21.91	0.2282063	0.00090792	0.251350591	0.00049087	0.464898054	0.000881413	0.258909587	6.6
5	22.01	0.22716947	0.00090792	0.250208608	0.00049087	0.462785841	0.000881413	0.257773326	6.6
5	22.15	0.22573363	0.00090792	0.248627154	0.00049087	0.459860784	0.000881413	0.256104246	6.6
5	22.32	0.22401434	0.00090792	0.246733488	0.00049087	0.45635826	0.000881413	0.254153631	6.6
5	22.1	0.22624434	0.00090792	0.249189659	0.00049087	0.460901193	0.000881413	0.256683667	6.6
5	22.17	0.22553	0.00090792	0.248402862	0.00049087	0.459445934	0.000881413	0.255873209	6.6



Tabla 14. Medidas para Calculo de "K" para TEE de acrílico (2).

No. Medico n	D Tubería (mm)	L (m)	TELESCOPIO				TUBERIA				TEE		Q (lts Promedio)
			V ² /2g	H _L	V ² _{conf} /2g	K (Calculado) Ec Promedio	h _k	10.3*Q ^{1.49} /D ^{4.75}	n (Manning) Ec. Promedio	h _f	V ² _{conf} /2g	K _{TEE}	
00.00	25	1.81	0.04090337	0.17509463	0.01195707	11.87215549	0.14195615	1262.568159	0.004746707	0.00859154	0.012687063	1.934800974	0.435538935
2	25	1.81	0.04148712	0.17451288	0.01212712	11.83526728	0.14195615	1280.524459	0.004746707	0.00848512	0.012867499	1.748595094	
3	25	1.81	0.04033576	0.17566424	0.01179056	11.910881	0.1403601	1244.98692	0.004796002	0.008680763	0.012510396	2.1220325	
4	25	1.81	0.04037741	0.17502259	0.01197813	11.86743997	0.1421497	1264.791969	0.004798891	0.008579204	0.012709409	1.91472064	
5	25	1.81	0.04238331	0.17361669	0.01238908	11.7832249	0.14590881	1308.185755	0.00450353	0.008290439	0.013145456	1.470883683	
6	25	1.81	0.03856447	0.17743553	0.0112728	12.0472239	0.13580594	1190.315179	0.004898328	0.008865974	0.01196102	2.739198739	
7	25	1.81	0.03929934	0.17670066	0.01148761	11.98779448	0.13771108	1212.997159	0.004865094	0.00880582	0.012188943	2.476323253	
8	25	1.81	0.04005541	0.17594459	0.01170861	11.93087318	0.139694	1236.333692	0.004817994	0.008719303	0.012424443	2.21607593	
9	25	1.81	0.03797845	0.17802155	0.0111015	12.09743207	0.13429961	1172.227073	0.00491569	0.008897398	0.01177926	2.956429013	
10	25	1.81	0.03936718	0.17663282	0.01150744	11.98250985	0.13788801	1215.09124	0.004861373	0.008798085	0.012209885	2.452560233	
11	25	1.81	0.03034963	0.13565037	0.00887151	12.94168527	0.1181233	936.7590545	0.004491195	0.008129063	0.009413132	1.350132628	0.372786786
12	25	1.81	0.02980525	0.13619475	0.00871239	13.01221957	0.11336748	919.955425	0.004472588	0.008004885	0.00924429	1.603409444	
13	25	1.81	0.0277679	0.1382321	0.00811685	13.28254916	0.10781243	857.0725665	0.004134734	0.007483869	0.008612393	2.663115959	
14	25	1.81	0.02989496	0.13610504	0.00873861	13.00033568	0.11360659	922.7254093	0.004434163	0.008025835	0.009277113	1.560875485	
15	25	1.81	0.03016652	0.13583348	0.00881799	12.96530937	0.11432797	931.1074291	0.00446856	0.008088094	0.009356341	1.434045077	
16	25	1.81	0.02958274	0.13641726	0.00864734	13.04129685	0.11277259	913.088565	0.004393437	0.007952121	0.00975277	1.71030834	
17	25	1.81	0.02850661	0.13740939	0.00855733	13.17241793	0.1100863	882.4659259	0.004256295	0.007703893	0.008867561	2.21468827	
18	25	1.81	0.02854861	0.13745139	0.00834506	13.17801413	0.10997128	881.1696118	0.004250249	0.007692951	0.008854535	2.234691729	
19	25	1.81	0.0298507	0.13601493	0.00876495	12.98882232	0.11384637	925.5067956	0.004455685	0.008046689	0.009300062	1.518470214	
20	25	1.81	0.029319	0.136681	0.00857025	13.07593067	0.11206401	904.9482336	0.004358091	0.007888145	0.009093477	1.839652982	
21	25	1.81	0.02239888	0.09376012	0.00650095	14.011194	0.09108607	686.4470051	0.00324318	0.005870156	0.006897842	-0.463349034	0.320355483
22	25	1.81	0.021823	0.0938177	0.00648412	14.01824066	0.09089594	684.667967	0.00324298	0.005854079	0.006879984	-0.426210771	
23	25	1.81	0.02206781	0.09393219	0.00645065	14.03218993	0.09051678	681.1360231	0.003216734	0.005822289	0.006844474	-0.351653865	
24	25	1.81	0.02170778	0.09429822	0.00634366	14.07620219	0.08929461	669.838269	0.003161519	0.00572235	0.006730948	-0.106782327	
25	25	1.81	0.02239888	0.09376012	0.00650095	14.011194	0.09108607	686.4470051	0.00324318	0.005870156	0.006897842	-0.463349034	
26	25	1.81	0.02102301	0.09497699	0.00614525	14.15519724	0.08698716	648.887482	0.003063573	0.00545067	0.006520421	0.370940449	
27	25	1.81	0.02019967	0.09580033	0.00590457	14.24564841	0.08411448	623.4745457	0.002954507	0.005347658	0.006265056	1.011674357	
28	25	1.81	0.02206781	0.09393219	0.00645065	14.03218993	0.09051678	681.1360231	0.003216734	0.005822289	0.006844474	-0.351653865	
29	25	1.81	0.02150845	0.0949155	0.00628714	14.09906641	0.08864287	663.6709199	0.00313299	0.005670712	0.006670984	0.02667795	
30	25	1.81	0.02189773	0.09410227	0.00640094	14.05275429	0.0895079	675.8864394	0.003190893	0.005750516	0.006791723	-0.239121017	
31	25	1.81	0.01112726	0.05487274	0.00325261	14.33756518	0.04663457	343.4494101	0.00315634	0.006798976	0.003451191	0.417013402	0.687402316
32	25	1.81	0.01101581	0.05498419	0.00322004	14.31957058	0.04610954	340.009465	0.00311307	0.006898465	0.003416625	0.578401785	
33	25	1.81	0.01104604	0.05495396	0.00322887	14.3245274	0.04625208	340.9424885	0.003796213	0.006871146	0.0034276	0.534366011	
34	25	1.81	0.01134478	0.05465522	0.0033162	14.37051057	0.04765544	350.1631797	0.003654341	0.006614357	0.003518655	0.109537955	
35	25	1.81	0.01101581	0.05498419	0.00322004	14.31957058	0.04610954	340.009465	0.003811307	0.006898465	0.003416625	0.578401785	
36	25	1.81	0.01091594	0.05508406	0.00319084	14.30278546	0.04563795	336.2168928	0.003862167	0.006990523	0.003385649	0.725294949	
37	25	1.81	0.01077839	0.05522161	0.00315064	14.27862177	0.04498673	332.6812318	0.003947462	0.007121919	0.00343986	0.931193592	
38	25	1.81	0.01061482	0.05538518	0.00310282	14.24826967	0.04420988	327.6380661	0.004005029	0.007285302	0.003292256	1.181599672	
39	25	1.81	0.01082721	0.05517759	0.00316491	14.28733938	0.04521811	334.1882796	0.003908652	0.007074659	0.00335813	0.857626167	
40	25	1.81	0.01075895	0.05524105	0.00314495	14.27510776	0.04489455	332.0812658	0.003945262	0.007140925	0.003336957	0.960629892	



4.6 Resumen de las pérdidas Locales calculadas en el modelo

Se muestra a continuación en la Tabla 15, el resumen de cada elemento en el cual se calculó su parámetro, así como su respectiva ecuación de valor de pérdida.

Tabla 15. Ecuación de Pérdidas de Accesorios y fricción.

Elemento	Ecuación	Máx (K)	Mín (K)
Boquilla de Tanque	$y = 599.54x^3 - 667.24x^2 + 226.79x - 9.812$	15.82	10.57
Válvula Globo	$y = 371.68x^3 - 382.15x^2 + 127.87x - 13.117$	1.005	0.544
Tubería (n)	$y = -1.6692x^3 + 1.7457x^2 - 0.5844x + 0.0661$	0.0072	0.00022
Codo 90°	$y = -4288x^3 + 3964.4x^2 - 1177.2x + 115.71$	6.86	2.26
Codo 45°	$y = -111.18x^3 + 89.364x^2 - 10.54x + 0.4249$	5.188	0.124
TEE	$y = 83.504x^2 - 46.42x + 6.8053$	26.76	9.211

Aunque el término “*Pérdida Local*” puede llevar a pensar que no son de gran importancia, y aunque muchos diseñadores las omitan en sus proyectos, cobran gran relevancia cuando se trata de redes con longitudes cortas y con gran densidad de accesorios y cambios de alineamiento. Tal es el caso, por ejemplo, de las redes domiciliarias, y más específicamente de las tomas domiciliarias, en las que algunos autores reportan pérdidas por accesorio del orden de unas 2 a 5 veces la magnitud de las pérdidas por fricción para diámetros entre 13 y 19 mm y gastos entre 0.20 y 0.40 l/s, por citar solo un caso.

A diferencia del caso de las pérdidas por fricción, donde existen numerosas expresiones para su determinación, ya sean de origen teórico o empírico, en el caso de las pérdidas menores son pocos los resultados que tienen fundamentación puramente teórica; por el contrario, lo usual es encontrar variedad de resultados experimentales reportados por diferentes investigadores y compañías proveedoras o fabricantes de los accesorios. Sin embargo, en muchas ocasiones, puede llegar a encontrarse resultados muy diferentes para accesorios similares, por los que debe tenerse mucha precaución en su utilización.

Aunque para la mayoría de los accesorios, se ha encontrado una variación del factor “K” con el número de Reynolds, Re, también se ha hallado que esta permanece constante para valores de Re superiores a 50,000. En otras palabras, se puede tomar “K” como constante para los casos en que el flujo se desarrolle en régimen turbulento. Lo que si debe recordarse es que el valor de dicho coeficiente depende del tipo de accesorio y de su configuración particular.



5. SIMULACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

5.1 Simulación en EPANET

EPANET es un programa de ordenador que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión. Una red puede estar constituida por tuberías, nudos (uniones entre tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. Efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo (Rossman, et al, 2020).

El programa proporciona un entorno integrado bajo Windows, para la edición de los datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulicas y de la calidad del agua, y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución y mapas de isolíneas.

El éxito de EPANET radica en su potente simulador hidráulico que ofrece las siguientes prestaciones:

- No existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesarse.
- Las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning.
- Contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc.
- Admite bombas de velocidad fija o variable.
- Determina el consumo energético y sus costes.
- Permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal.
- Admite depósitos de geometría variable (esto es, cuyo diámetro varíe con el nivel)
- Considera diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo.
- Permite modelar tomas de agua cuyo caudal dependa de la presión (p.ej. rociadores)



- Admite leyes de control simples, basadas en el valor del nivel en los depósitos o en la hora prefijada por un temporizador, y leyes de control más complejas basadas en reglas lógicas.

Hoy en día, en el estudio y análisis de las redes de abastecimiento se hace indispensable el recurrir a programas informáticos como EPANET, de los cuales se obtienen, de manera instantánea, los valores de presiones y caudales en función de los parámetros definidos.

En general, tanto EPANET como el resto de los programas dirigidos al cálculo de redes, necesitan la definición de los siguientes componentes, con el objetivo de obtener un modelo de la red lo más próximo a la realidad (Tabla 16):

Tabla 16. Descripción de Elementos de Modelo físico.

Componentes Físicos		Componentes No Físicos
Elementos Puntuales	Elementos Lineales	
Nodos	Tuberías	Curvas de Comportamiento
Embalses	Bombas	Curvas de Modulación o Patrones
Depósitos	Válvulas	Leyes de Control

El comportamiento de cada uno de estos elementos se rige por las ecuaciones de *continuidad en nudos* y de *conservación de la energía*, así como por la relación entre la diferencia de alturas piezométricas de los extremos de cada elemento lineal y su caudal circulante. Estas expresiones relacionan las incógnitas que buscamos (caudales y presiones) con los parámetros y resto de variables que definen la red.

Del conjunto de relaciones anteriores se obtienen dos sistemas de ecuaciones no lineales, uno aplicando la ecuación de continuidad en nudos, y otro basado en las pérdidas de carga de los elementos de la red. De su resolución se obtendrán los caudales circulantes y las presiones en los nudos.

El carácter no lineal de estos sistemas de ecuaciones hace indispensable la aplicación de métodos numéricos de resolución. Concretamente, EPANET utiliza el método de Newton-Raphson para hallar la solución simultánea del sistema de ecuaciones de balance de masa y



energía. El problema es resuelto mediante la solución iterativa de un sistema de ecuaciones lineales de tamaño igual al número de alturas piezométricas desconocidas.

5.2 Pruebas Experimentales de Gasto y Velocidades en el Modelo Físico

Las pruebas experimentales de Gasto y Velocidad fueron realizadas en el modelo de laboratorio descrito en el capítulo anterior.

Con el fin de establecer comparaciones entre los registros del fenómeno físico y los resultados del modelo matemático simulado en EPANET, se establecieron diferentes condiciones hidráulicas con el gasto de entrada y presión de entrada, de tal forma que el manejo de variables fuera compatible entre los resultados experimentales y del modelo.

Se efectuaron 150 mediciones de Gastos volumétricos a la salida del modelo, a partir de las condiciones de flujo permanente. Después de estabilizar el aire atrapado, bajo una cierta apertura de la válvula que se encuentra a la entrada del tubo de pruebas, y medir todas las condiciones hidráulicas del flujo y geométricas, se procedió a incrementar la apertura de la válvula para aumentar el gasto y la velocidad del flujo, con el fin de provocar la remoción del aire atrapado. La apertura final de la válvula y el tiempo en que sucedía. Las aperturas iniciales de la válvula variaron del en función de la presión registrada en el manómetro de entrada.

Los registros obtenidos en las 150 mediciones se muestran en las Tablas 17 y 18. Es importante anotar que el número de medición corresponde con las mediciones descritas, en donde además de la prueba de pérdida de carga piezométrica, En las siguientes Figuras 24 a 25 se muestran imágenes del aire atrapado, captado durante la ejecución de las pruebas.

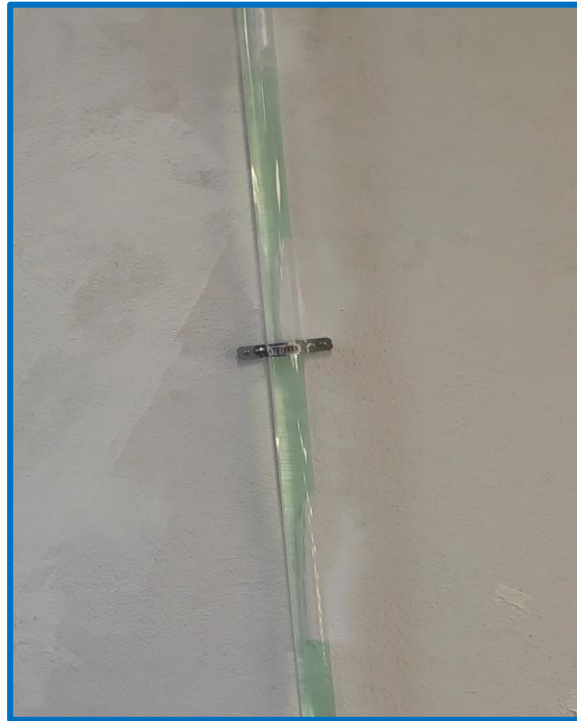


Figura 24 Flujo con Aire en Tubería.

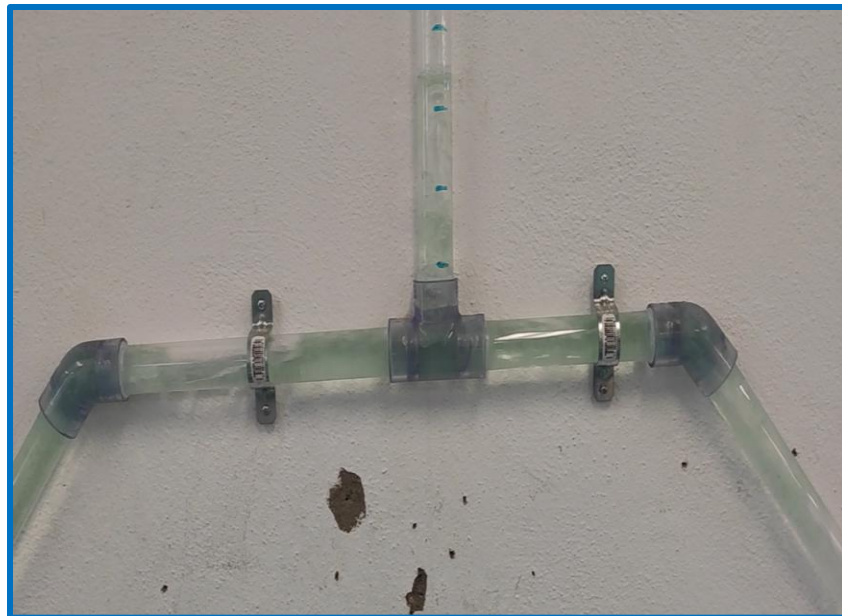


Figura 25 Flujo con Aire en Accesorios.



Tabla 17. Datos Medidos de Gasto en Tanque de 30 cm.

TANQUE DE 30 CM								
				Aforado	TUBERIA			
Hora	Tirante (cm)	Vol (Lts)	Tiempo(Seg)	Q Practico (lts/seg)	Area (m2) Salida Tubería	Vel salida Tubería(m/s)	Promdio Q	Vel Promedio
10:00	25	5	9.64	0.5186722	0.00049087	1.056630328	0.5086677	1.03624933
	25	5	9.58	0.52192067	0.00049087	1.063248054		
	25	5	10.24	0.48828125	0.00049087	0.994718394		
	25	5	9.64	0.5186722	0.00049087	1.056630328		
	25	5	9.87	0.50658561	0.00049087	1.032007736		
	25	5	9.91	0.50454087	0.00049087	1.027842216		
	25	5	9.98	0.501002	0.00049087	1.020632902		
	25	5	9.79	0.51072523	0.00049087	1.040440895		
	25	5	9.8	0.51020408	0.00049087	1.03937922		
	25	5	9.88	0.50607287	0.00049087	1.030963194		
	20	5	10.6	0.47169811	0.00049087	0.960935505	0.46773808	0.9528682
	20	5	10.74	0.46554935	0.00049087	0.948409344		
	20	5	10.35	0.48309179	0.00049087	0.984146508		
	20	5	11.11	0.450045	0.00049087	0.916824155		
	20	5	10.43	0.47938639	0.00049087	0.976597925		
	20	5	10.9	0.4587156	0.00049087	0.934487739		
	20	5	10.71	0.46685341	0.00049087	0.951065953		
	20	5	10.56	0.47348485	0.00049087	0.964575413		
	20	5	10.69	0.46772685	0.00049087	0.952845309		
	20	5	10.85	0.46082949	0.00049087	0.938794134		
	15	5	11.37	0.43975374	0.00049087	0.895858958	0.42825399	0.87238772
	15	5	12.85	0.38910506	0.00049087	0.792678316		
	15	5	11.46	0.43630017	0.00049087	0.888823417		
	15	5	11.58	0.43177893	0.00049087	0.879612812		
	15	5	11.78	0.42444822	0.00049087	0.864678808		
	15	5	11.48	0.43554007	0.00049087	0.887274944		
	15	5	11.49	0.43516101	0.00049087	0.886502729		
	15	5	11.21	0.44603033	0.00049087	0.908645527		
	15	5	12.02	0.41597338	0.00049087	0.847414006		
	15	5	11.67	0.42844901	0.00049087	0.872829165		
	10	5	13.05	0.38314176	0.00049087	0.780529989	0.36355461	0.74062736
	10	5	13.05	0.38314176	0.00049087	0.780529989		
	10	5	13.78	0.3628447	0.00049087	0.739181158		
	10	5	14.75	0.33898305	0.00049087	0.690570601		
	10	5	13.58	0.36818851	0.00049087	0.750067478		
	10	5	13.32	0.37537538	0.00049087	0.764708435		
	10	5	13.96	0.35816619	0.00049087	0.729650169		
	10	5	14.18	0.35260931	0.00049087	0.718329785		
	10	5	14.88	0.33602151	0.00049087	0.68453739		
	10	5	13.26	0.37707391	0.00049087	0.768168654		



Tabla 18. Medidas de Gasto con Manómetro y Válvula Reductora en Modelo.

MANOMETRO Y VALVULA REDUCTORA												
Pinical=	68 kpa											
Hora	P Man (kpa)	Diferencial de Presion (mca)	Vol (Lts)	Tiempo(Seg)	Q Practico (lts/seg)	Area (m2) Salida Tuberia	Vel salida Tuberia(m/s)	Promdio Q	Vel Promedio	Piezometro 1 (cm)	Piezometro 2 (cm)	Piezometro 3 (cm)
10:00	65	0.306	5	19.94	0.25075226	0.00049087	0.510828303	0.2481343	0.50549504	0	0	0
	65	0.306	5	20.05	0.24937656	0.00049087	0.508025754					
	65	0.306	5	18.99	0.26329647	0.00049087	0.536383168					
	65	0.306	5	19.63	0.25471218	0.00049087	0.518895382					
	65	0.306	5	20.14	0.24826216	0.00049087	0.505755529					
	65	0.306	5	21.18	0.23607177	0.00049087	0.480921452					
	65	0.306	5	19.32	0.25879917	0.00049087	0.527221344					
	65	0.306	5	20.54	0.24342746	0.00049087	0.495906347					
	65	0.306	5	20.28	0.24654832	0.00049087	0.50226412					
	65	0.306	5	21.73	0.23009664	0.00049087	0.468749027					
	60	0.815	5	10.59	0.47214353	0.00049087	0.961842904	0.44941078	0.91553213	0	0	0
	60	0.815	5	11.29	0.4428698	0.00049087	0.90220694					
	60	0.815	5	11.01	0.45413261	0.00049087	0.925151349					
	60	0.815	5	10.86	0.46040516	0.00049087	0.937929683					
	60	0.815	5	11.53	0.43365134	0.00049087	0.883427264					
	60	0.815	5	11.31	0.44208665	0.00049087	0.900611526					
	60	0.815	5	11.26	0.44404973	0.00049087	0.904610689					
	60	0.815	5	11.51	0.43440487	0.00049087	0.884962325					
	60	0.815	5	10.92	0.45787546	0.00049087	0.932776223					
	60	0.815	5	11.05	0.45248869	0.00049087	0.921802385					
	58	1.019	5	10.93	0.45745654	0.00049087	0.931922814	0.44541695	0.90954568	0	0	0
	58	1.019	5	11.16	0.44802867	0.00049087	0.91271652					
	58	1.019	5	11.1	0.45045045	0.00049087	0.917650122					
	58	1.019	5	11.32	0.44169611	0.00049087	0.899815933					
	58	1.019	5	11.05	0.45248869	0.00049087	0.921802385					
	58	1.019	5	10.9	0.4587156	0.00049087	0.934487739					
	58	1.019	5	11.37	0.43975374	0.00049087	0.895858958					
	58	1.019	5	11.38	0.43936731	0.00049087	0.895071736					
	58	1.019	5	11.62	0.4302926	0.00049087	0.876584884					
	58	1.019	5	11.47	0.43591979	0.00049087	0.888048505					
	55	1.325	5	9.59	0.52137643	0.00049087	1.062139349	0.51265501	1.04632401	0	12	0
	55	1.325	5	9.91	0.50454087	0.00049087	1.027842216					
	55	1.325	5	9.49	0.52687039	0.00049087	1.073331545					
	55	1.325	5	9.81	0.509684	0.00049087	1.03831971					
	55	1.325	5	9.89	0.50556117	0.00049087	1.029920764					
	55	1.325	5	9.65	0.51813472	0.00049087	1.055535374					
	55	1.325	5	9.73	0.51387461	0.00049087	1.046856769					
	55	1.325	5	10.1	0.4950495	0.00049087	1.00850657					
	55	1.325	5	9.48	0.52742616	0.00049087	1.074463751					
	55	1.325	5	9.92	0.50403226	0.00049087	1.026806084					
	52	1.631	5	8.76	0.57077626	0.00049087	1.16277584	0.55327496	1.1271225	0	17.5	0
	52	1.631	5	8.67	0.57670127	0.00049087	1.174846177					
	52	1.631	5	9.07	0.55126792	0.00049087	1.123033777					
	52	1.631	5	8.75	0.57142857	0.00049087	1.164104727					
	52	1.631	5	9.15	0.54644809	0.00049087	1.113214903					
	52	1.631	5	8.93	0.55991041	0.00049087	1.14064013					
	52	1.631	5	8.87	0.56369786	0.00049087	1.148355846					
	52	1.631	5	9.28	0.5387931	0.00049087	1.097620297					
	52	1.631	5	9.71	0.51493306	0.00049087	1.049013013					
	52	1.631	5	9.28	0.5387931	0.00049087	1.097620297					
	50	1.835	5	8.02	0.6234414	0.00049087	1.270064384	0.60924361	1.24114089	6	22	0
	50	1.835	5	8.27	0.60459492	0.00049087	1.23167066					
	50	1.835	5	8.29	0.60313631	0.00049087	1.228699199					
	50	1.835	5	8.1	0.61728395	0.00049087	1.257520538					
	50	1.835	5	8.19	0.61050061	0.00049087	1.243701631					
	50	1.835	5	8.47	0.59031877	0.00049087	1.202587527					
	50	1.835	5	8.19	0.61050061	0.00049087	1.243701631					
	50	1.835	5	8.23	0.60753341	0.00049087	1.237656909					
	50	1.835	5	8.31	0.60168472	0.00049087	1.225742041					
	50	1.835	5	8.02	0.6234414	0.00049087	1.270064384					
	48	2.039	5	7.86	0.63613232	0.00049087	1.295918112	0.62416537	1.27153924	12	24.5	0
	48	2.039	5	8.21	0.6090134	0.00049087	1.240671907					
	48	2.039	5	8.04	0.62189055	0.00049087	1.26690502					
	48	2.039	5	7.89	0.63371356	0.00049087	1.290990666					
	48	2.039	5	8.12	0.61576355	0.00049087	1.254423197					
	48	2.039	5	8.06	0.62034739	0.00049087	1.263761335					
	48	2.039	5	8.07	0.61957869	0.00049087	1.262195336					
	48	2.039	5	7.95	0.62893082	0.00049087	1.281247341					
	48	2.039	5	7.95	0.62893082	0.00049087	1.281247341					
	48	2.039	5	7.97	0.62735257	0.00049087	1.278032165					



	46	2.243	5	7.55	0.66225166	0.00049087	1.349127994	0.64074069	1.30530622	21	28	0
	46	2.243	5	8.03	0.62266501	0.00049087	1.268482734					
	46	2.243	5	7.68	0.65104167	0.00049087	1.326291192					
	46	2.243	5	7.85	0.63694268	0.00049087	1.297568963					
	46	2.243	5	7.75	0.64516129	0.00049087	1.314311788					
	46	2.243	5	7.96	0.6281407	0.00049087	1.279637733					
	46	2.243	5	7.85	0.63694268	0.00049087	1.297568963					
	46	2.243	5	7.9	0.63291139	0.00049087	1.289356501					
	46	2.243	5	7.65	0.65359477	0.00049087	1.331492334					
	46	2.243	5	7.84	0.6377551	0.00049087	1.299224025					
	45	2.345	5	7.23	0.69156293	0.00049087	1.408840437	0.67108601	1.36712518	30	32	0
	45	2.345	5	7.42	0.67385445	0.00049087	1.372765008					
	45	2.345	5	7.29	0.68587106	0.00049087	1.397245042					
	45	2.345	5	7.67	0.65189048	0.00049087	1.328020386					
	45	2.345	5	7.38	0.67750678	0.00049087	1.380205469					
	45	2.345	5	7.37	0.67842605	0.00049087	1.382078203					
	45	2.345	5	7.52	0.66489362	0.00049087	1.354510154					
	45	2.345	5	7.62	0.65616798	0.00049087	1.33673443					
	45	2.345	5	7.49	0.66755674	0.00049087	1.359935428					
	45	2.345	5	7.54	0.66312997	0.00049087	1.350917289					
	44	2.446	5	7.39	0.67658999	0.00049087	1.378337802	0.67970974	1.38469332	35	33.5	0
	44	2.446	5	7.42	0.67385445	0.00049087	1.372765008					
	44	2.446	5	7.27	0.68775791	0.00049087	1.401088908					
	44	2.446	5	7.4	0.67567568	0.00049087	1.376475183					
	44	2.446	5	7.34	0.68119891	0.00049087	1.387727024					
	44	2.446	5	7.53	0.66401062	0.00049087	1.352711336					
	44	2.446	5	7.27	0.68775791	0.00049087	1.401088908					
	44	2.446	5	7.4	0.67567568	0.00049087	1.376475183					
	44	2.446	5	7.26	0.68870523	0.00049087	1.403018782					
	44	2.446	5	7.29	0.68587106	0.00049087	1.397245042					
	40	2.854	5	7.07	0.70721358	0.00049087	1.440723672	0.71478642	1.45615094	50	36.5	0
	40	2.854	5	6.94	0.7204611	0.00049087	1.467711291					
	40	2.854	5	7.05	0.70921986	0.00049087	1.444810831					
	40	2.854	5	7.05	0.70921986	0.00049087	1.444810831					
	40	2.854	5	7.08	0.70621469	0.00049087	1.438688751					
	40	2.854	5	7.02	0.71225071	0.00049087	1.450985236					
	40	2.854	5	6.92	0.72254335	0.00049087	1.471953231					
	40	2.854	5	7.11	0.70323488	0.00049087	1.432618334					
	40	2.854	5	7.03	0.71123755	0.00049087	1.448921246					
	40	2.854	5	6.7	0.74626866	0.00049087	1.520286024					

En cuanto a los parámetros indicados en las tablas anteriores algunos fueron medidos y otros calculados durante todo el recorrido del sistema y tiempo determinado. En las mismas tablas se presentan los valores de los parámetros medidos durante el flujo transitorio como son: el gasto, velocidad, piezometría, longitudes de tramos de tubos. Asimismo, se muestran los valores de estos parámetros al final del evento transitorio, después de que se alcanza el flujo permanente.

Se observa que la geometría del gasto permanece constante mientras el flujo es transitorio, es decir, el volumen de aire que ingresa al sistema no cambia significativamente el gasto durante la prueba, el tirante si se modifica dependiendo la entrada del aire al sistema. Esto no se considera para efectos de la simulación numérica en el modelo matemático.

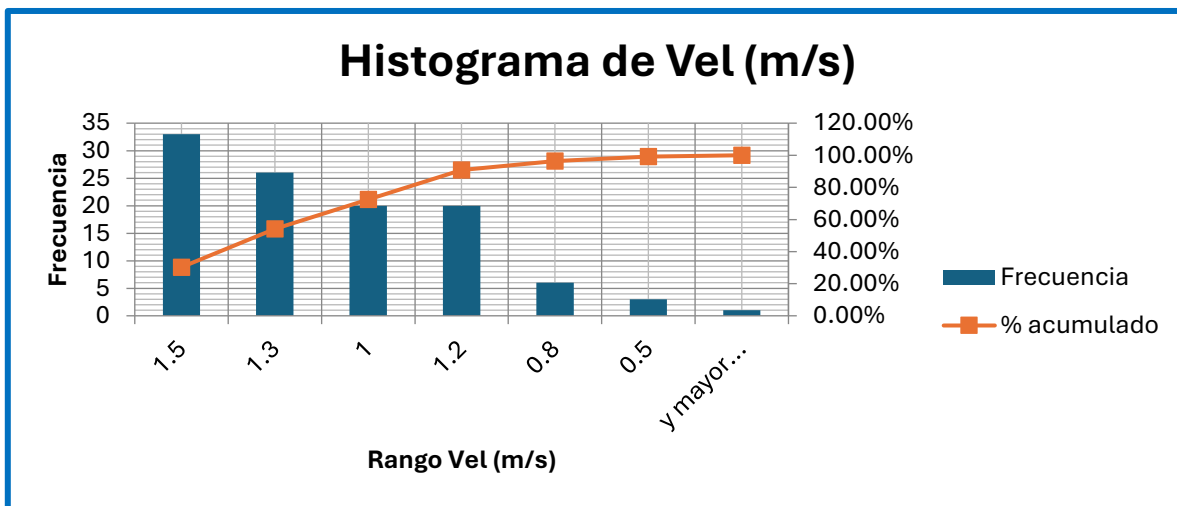
Con todos estos registros de las mediciones, se obtuvieron, histogramas en los cuales se ve el comportamiento de algunos parámetros hidráulicos que se registraron. Se muestran tanto



las tablas (19 a 20) de cálculo como los histogramas (Gráficas 7 a 10) de la variación de velocidades que se presentaron en el sistema con las mediciones hechas.

Tabla 19. Datos que permiten la elaboración del Histograma de Velocidad Medidos.

Rango Vel (m/s)	Frecuencia	% acumulado	Rango Vel (m/s)	Frecuencia	% acumulado
0.5	3	2.75%	1.5	33	30.28%
0.8	6	8.26%	1.3	26	54.13%
1	20	26.61%	1	20	72.48%
1.2	20	44.95%	1.2	20	90.83%
1.3	26	68.81%	0.8	6	96.33%
1.5	33	99.08%	0.5	3	99.08%
y mayor...	1	100.00%	y mayor...	1	100.00%



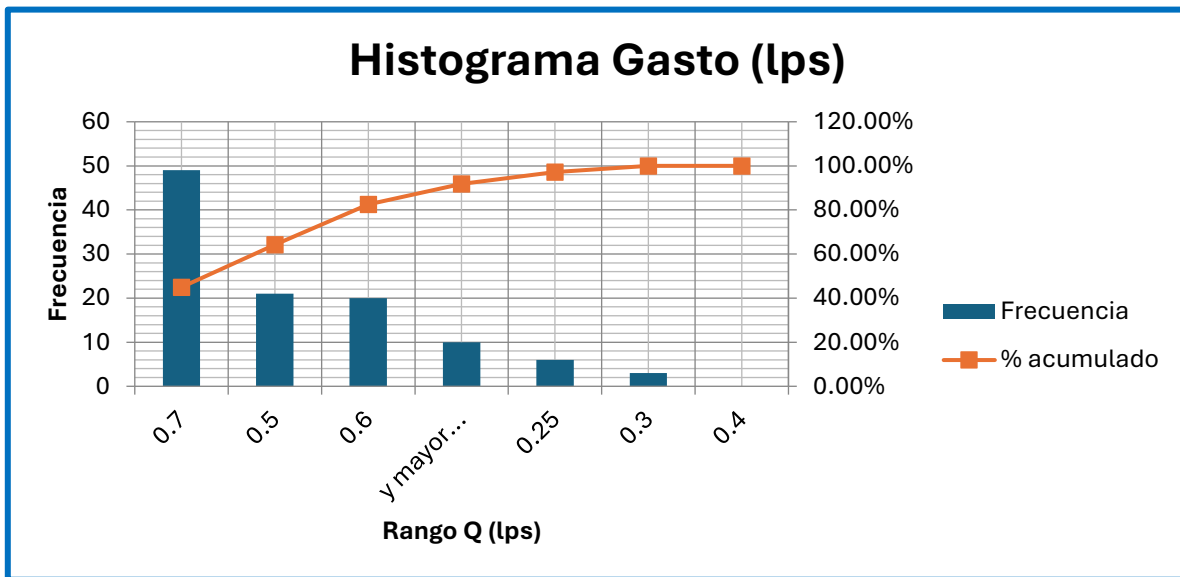
Gráfica 7. Histograma de Velocidad medida.

Se puede observar que existe una mayor acumulación de datos presentados en la curva para una velocidad en el rango de 1.5 m/s la cual se debe a los datos de mayores gastos. Se muestra el histograma de la variación de gasto o caudal que se presentaron en el sistema con las mediciones hechas.



Tabla 20 Histograma de Gasto Medidos

Rango Q (lps)	Frecuencia	% acumulado	Rango Q (lps)	Frecuencia	% acumulado
0.25	6	5.50%	0.7	49	44.95%
0.3	3	8.26%	0.5	21	64.22%
0.4	0	8.26%	0.6	20	82.57%
0.5	21	27.52%	y mayor...	10	91.74%
0.6	20	45.87%	0.25	6	97.25%
0.7	49	90.83%	0.3	3	100.00%
y mayor...	10	100.00%	0.4	0	100.00%



Gráfica 8. Histograma de Gasto medido.

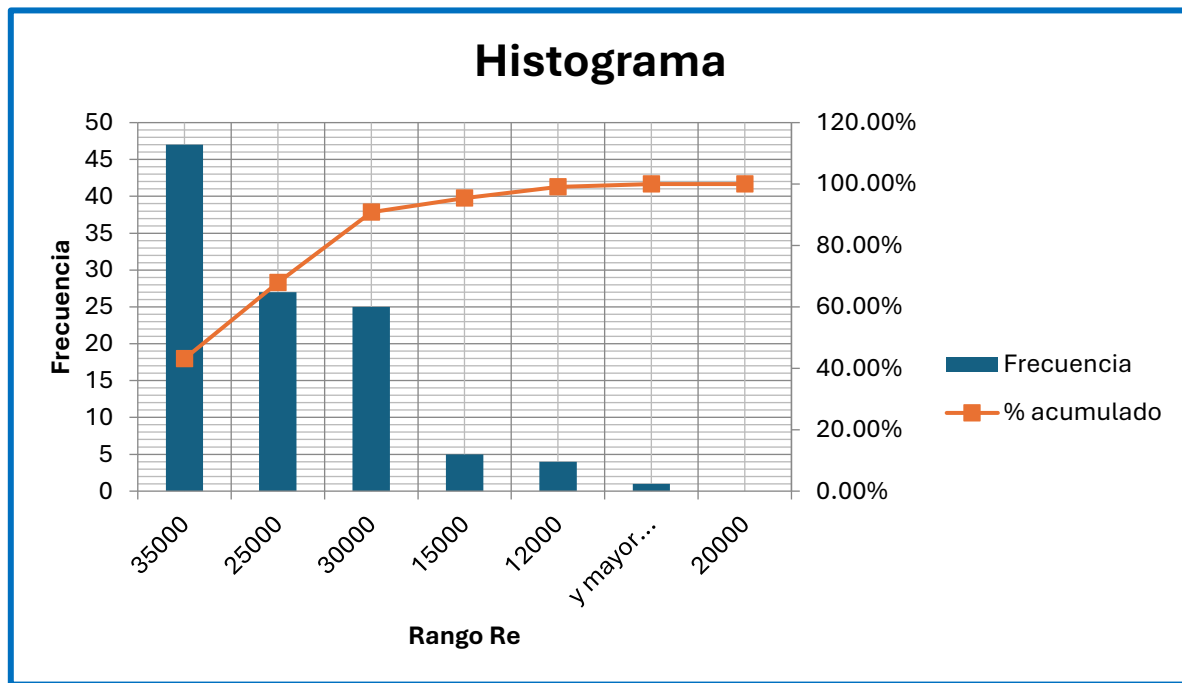
Se observa y se muestra que el gasto de mayor acumulación es de un rango de 0.7 lps el cual representa la acumulación de la mayoría de los gastos que se midieron. Se muestran la Tabla 21 y el histograma (Gráfica 9) de la variación de Numero de Reynolds que se presentaron en el sistema con las mediciones hechas.



Tabla 21. Histograma de Numero de Reynolds.

Rango Re	Frecuencia	% acumulado	Rango Re	Frecuencia	% acumulado
12000	4	3.67%	35000	47	43.12%
15000	5	8.26%	25000	27	67.89%
20000	0	8.26%	30000	25	90.83%
25000	27	33.03%	15000	5	95.41%
30000	25	55.96%	12000	4	99.08%
35000	47	99.08%	y mayor...	1	100.00%
y mayor...	1	100.00%	20000	0	100.00%

A continuación, se presentan todos los resultados de las simulaciones de manera teórica para determinar los parámetros hidráulicos del modelo:



Grafica 9. Histograma de Numero de Reynolds.

Con respecto al Número de Reynolds existe una dispersión en los datos presentados en la curva para valores mayores a 35000 la cual se debe a la geometría y a la estabilización modelo de simulación después de un tiempo determinado.



5.3 Resultados del Cálculo de la Simulación Matemática en EPANET

Con el objeto de comprobar la validez de los modelos matemáticos, se realizaron una serie de simulaciones con las cargas hidráulicas propuesta en los registros experimentales (Figura 26). Las condiciones iniciales para la simulación de cada evento son las que se obtuvieron que se indican en cada tabla (22 a 43) que se muestra a continuación.

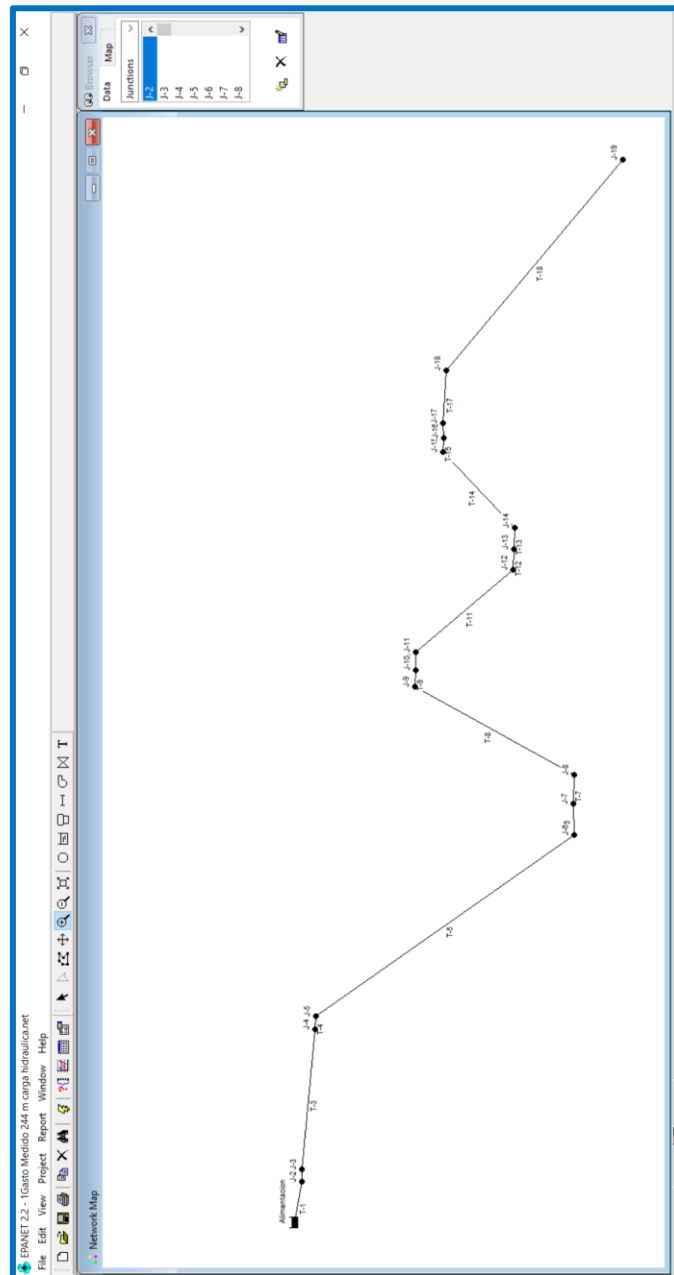


Figura 26. Modelo de Simulación en EPANET.



Tabla 22. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 30 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 30 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.7941	-0.25	2.79	0
Junc J-2	2.488	0	2.6	0.12
Junc J-3	2.47	0	2.58	0.11
Junc J-4	2.354	0	2.56	0.21
Junc J-5	2.343	0	2.55	0.21
Junc J-6	0.264	0	2.53	2.26
Junc J-7	0.263	0	2.51	2.24
Junc J-8	0.257	0	2.5	2.24
Junc J-9	1.501	0	2.48	0.98
Junc J-10	1.51	0	2.45	0.94
Junc J-11	1.508	0	2.43	0.93
Junc J-12	0.892	0	2.41	1.52
Junc J-13	0.896	0	2.39	1.49
Junc J-14	0.897	0	2.38	1.49
Junc J-15	1.265	0	2.36	1.1
Junc J-16	1.269	0	2.34	1.07
Junc J-17	1.274	0	2.33	1.06
Junc J-18	1.245	0	2.31	1.06
Junc J-19	0.002	0.25	2.21	2.21

Tabla 23. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 30 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs							
Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Facto
Pipe T-1	0.2671	25	0.0028	0.25	0.51	709.59	1.363
Pipe T-2	0.1567	25	0.0028	0.25	0.51	135.42	0.26
Pipe T-3	1.742	25	0.0028	0.25	0.51	13.75	0.026
Pipe T-4	0.0959	25	0.0028	0.25	0.51	62.79	0.121
Pipe T-5	2.3424	25	0.0028	0.25	0.51	10.67	0.021
Pipe T-6	0.3928	25	0.0028	0.25	0.51	55.06	0.106
Pipe T-7	0.3389	25	0.0028	0.25	0.51	19.01	0.037
Pipe T-8	1.6353	25	0.0028	0.25	0.51	14.54	0.028
Pipe T-9	0.333	25	0.0028	0.25	0.51	64.64	0.124
Pipe T-10	0.2408	25	0.0028	0.25	0.51	88.73	0.17
Pipe T-11	0.8325	25	0.0028	0.25	0.51	26.89	0.052
Pipe T-12	0.1647	25	0.0028	0.25	0.51	128.93	0.248
Pipe T-13	0.1733	25	0.0028	0.25	0.51	35.52	0.068
Pipe T-14	0.5275	25	0.0028	0.25	0.51	41.44	0.08
Pipe T-15	0.1261	25	0.0028	0.25	0.51	167.87	0.322
Pipe T-16	0.0806	25	0.0028	0.25	0.51	74.38	0.143
Pipe T-17	0.6276	25	0.0028	0.25	0.51	47.13	0.091
Pipe T-18	3.6347	25	0.0028	0.25	0.51	25.14	0.048



Tabla 24. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 81 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 81 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	3.3031	-0.45	3.3	0
Junc J-2	2.488	0	2.8	0.31
Junc J-3	2.47	0	2.64	0.17
Junc J-4	2.354	0	2.46	0.1
Junc J-5	2.343	0	2.38	0.04
Junc J-6	0.264	0	2.19	1.93
Junc J-7	0.263	0	2.03	1.77
Junc J-8	0.257	0	1.96	1.7
Junc J-9	1.501	0	1.77	0.27
Junc J-10	1.51	0	1.61	0.1
Junc J-11	1.508	0	1.54	0.03
Junc J-12	0.892	0	1.37	0.48
Junc J-13	0.896	0	1.21	0.32
Junc J-14	0.897	0	1.14	0.24
Junc J-15	1.265	0	0.98	-0.29
Junc J-16	1.269	0	0.82	-0.45
Junc J-17	1.274	0	0.75	-0.53
Junc J-18	1.245	0	0.66	-0.59
Junc J-19	0.002	0.45	0.36	0.36

Tabla 25. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 81 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Facto	Posicion 0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0047	0.45	0.92	1894.14	1.109	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0047	0.45	0.92	1007.72	0.59	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0047	0.45	0.92	105.19	0.062	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0047	0.45	0.92	741.64	0.434	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0047	0.45	0.92	82.32	0.048	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0047	0.45	0.92	411.61	0.241	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0047	0.45	0.92	221.32	0.13	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0047	0.45	0.92	111.01	0.065	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0047	0.45	0.92	482.66	0.283	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0047	0.45	0.92	304.98	0.179	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0047	0.45	0.92	202.65	0.119	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0047	0.45	0.92	959.55	0.562	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0047	0.45	0.92	417.54	0.244	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0047	0.45	0.92	310.58	0.182	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0047	0.45	0.92	1248.39	0.731	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0047	0.45	0.92	879.39	0.515	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0047	0.45	0.92	141.83	0.083	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0047	0.45	0.92	81.17	0.048	13.7119



Tabla 26. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 101 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 101 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	3.4981	-0.45	3.5	0
Junc J-2	2.488	0	3	0.51
Junc J-3	2.47	0	2.84	0.37
Junc J-4	2.354	0	2.67	0.31
Junc J-5	2.343	0	2.59	0.24
Junc J-6	0.264	0	2.4	2.13
Junc J-7	0.263	0	2.24	1.98
Junc J-8	0.257	0	2.16	1.9
Junc J-9	1.501	0	1.98	0.48
Junc J-10	1.51	0	1.82	0.31
Junc J-11	1.508	0	1.74	0.23
Junc J-12	0.892	0	1.58	0.68
Junc J-13	0.896	0	1.42	0.53
Junc J-14	0.897	0	1.34	0.45
Junc J-15	1.265	0	1.18	-0.08
Junc J-16	1.269	0	1.03	-0.24
Junc J-17	1.274	0	0.95	-0.32
Junc J-18	1.245	0	0.9	-0.35
Junc J-19	0.002	0.45	0.71	0.71

Tabla 27. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 101 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
	Length	Diameter	Roughness	Flow	Velocity	Unit Headloss	Friction Facto	Posicion
Link ID	m	mm		LPS	m/s	m/km		0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0047	0.45	0.91	1866.85	1.113	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0047	0.45	0.91	987.19	0.588	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0047	0.45	0.91	103.08	0.061	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0047	0.45	0.91	815.96	0.486	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0047	0.45	0.91	80.68	0.048	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0047	0.45	0.91	403.25	0.24	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0047	0.45	0.91	242.15	0.144	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0047	0.45	0.91	108.78	0.065	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0047	0.45	0.91	472.85	0.282	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0047	0.45	0.91	334.4	0.199	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0047	0.45	0.91	198.55	0.118	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0047	0.45	0.91	940	0.56	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0047	0.45	0.91	458.54	0.273	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0047	0.45	0.91	304.28	0.181	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0047	0.45	0.91	1222.94	0.729	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0047	0.45	0.91	967.87	0.577	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0047	0.45	0.91	84.52	0.05	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0047	0.45	0.91	51.34	0.031	13.7119



Tabla 28. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 132 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 132 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	3.8131	-0.51	3.81	0
Junc J-2	2.488	0	3.15	0.66
Junc J-3	2.47	0	2.95	0.48
Junc J-4	2.354	0	2.7	0.34
Junc J-5	2.343	0	2.57	0.23
Junc J-6	0.264	0	2.31	2.04
Junc J-7	0.263	0	2.1	1.83
Junc J-8	0.257	0	1.97	1.71
Junc J-9	1.501	0	1.72	0.22
Junc J-10	1.51	0	1.51	0
Junc J-11	1.508	0	1.38	-0.12
Junc J-12	0.892	0	1.16	0.27
Junc J-13	0.896	0	0.96	0.07
Junc J-14	0.897	0	0.84	-0.06
Junc J-15	1.265	0	0.62	-0.64
Junc J-16	1.269	0	0.42	-0.84
Junc J-17	1.274	0	0.3	-0.97
Junc J-18	1.245	0	-0.1	-1.35
Junc J-19	0	0.51	-0.59	-0.59

Tabla 29 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 132 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Facto	Posicion 0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0057	0.51	1.04	2494.93	1.123	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0057	0.51	1.04	1278.34	0.575	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0057	0.51	1.04	142.81	0.064	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0057	0.51	1.04	1304.84	0.587	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0057	0.51	1.04	114.04	0.051	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0057	0.51	1.04	528.34	0.238	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0057	0.51	1.04	391.15	0.176	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0057	0.51	1.04	150.13	0.068	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0057	0.51	1.04	617.73	0.278	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0057	0.51	1.04	538.06	0.242	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0057	0.51	1.04	265.43	0.119	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0057	0.51	1.04	1217.73	0.548	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0057	0.51	1.04	735.72	0.331	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0057	0.51	1.04	401.23	0.181	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0057	0.51	1.04	1581.13	0.712	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0057	0.51	1.04	1546.74	0.696	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0057	0.51	1.04	637.72	0.287	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0057	0.51	1.04	134.18	0.06	13.7119



Tabla 30 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 163 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 163 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	4.1191	-0.55	4.12	0
Junc J-2	2.488	0	3.27	0.78
Junc J-3	2.47	0	3.06	0.59
Junc J-4	2.354	0	2.78	0.42
Junc J-5	2.343	0	2.58	0.24
Junc J-6	0.264	0	2.27	2
Junc J-7	0.263	0	2.05	1.78
Junc J-8	0.257	0	1.84	1.58
Junc J-9	1.501	0	1.56	0.06
Junc J-10	1.51	0	1.34	-0.17
Junc J-11	1.508	0	1.14	-0.37
Junc J-12	0.892	0	0.9	0.01
Junc J-13	0.896	0	0.69	-0.21
Junc J-14	0.897	0	0.49	-0.41
Junc J-15	1.265	0	0.26	-1
Junc J-16	1.269	0	0.05	-1.22
Junc J-17	1.274	0	-0.14	-1.42
Junc J-18	1.245	0	-0.32	-1.56
Junc J-19	0	0.55	-0.89	-0.89

Tabla 31 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 163 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Posicion 0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0066	0.55	1.13	3179.52	1.229	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0066	0.55	1.13	1335.84	0.516	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0066	0.55	1.13	163.6	0.063	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0066	0.55	1.13	2037.81	0.787	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0066	0.55	1.13	133.9	0.052	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0066	0.55	1.13	561.6	0.217	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0066	0.55	1.13	610.87	0.236	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0066	0.55	1.13	171.16	0.066	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0066	0.55	1.13	653.88	0.253	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0066	0.55	1.13	840.29	0.325	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0066	0.55	1.13	290.19	0.112	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0066	0.55	1.13	1273.27	0.492	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0066	0.55	1.13	1148.99	0.444	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0066	0.55	1.13	430.38	0.166	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0066	0.55	1.13	1648.42	0.637	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0066	0.55	1.13	2415.58	0.933	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0066	0.55	1.13	280.7	0.108	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0057	0.55	1.13	156.28	0.06	13.7119



Tabla 32 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 183 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 183 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	4.3181	-0.61	4.32	0
Junc J-2	2.488	0	3.02	0.53
Junc J-3	2.47	0	2.85	0.38
Junc J-4	2.354	0	2.53	0.18
Junc J-5	2.343	0	2.29	-0.05
Junc J-6	0.264	0	1.92	1.66
Junc J-7	0.263	0	1.73	1.47
Junc J-8	0.257	0	1.47	1.21
Junc J-9	1.501	0	1.16	-0.34
Junc J-10	1.51	0	0.89	-0.62
Junc J-11	1.508	0	0.64	-0.87
Junc J-12	0.892	0	0.41	-0.48
Junc J-13	0.896	0	0.23	-0.66
Junc J-14	0.897	0	-0.01	-0.91
Junc J-15	1.265	0	-0.22	-1.48
Junc J-16	1.269	0	-0.39	-1.66
Junc J-17	1.274	0	-0.63	-1.9
Junc J-18	1.245	0	-0.86	-2.11
Junc J-19	0	0.61	-1.72	-1.72

Tabla 33 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 183 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
Link ID	Length	Diameter	Roughness	Flow	Velocity	Unit Headloss	Friction Facto	Posicion
	m	mm		LPS	m/s	m/km		0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0082	0.61	1.24	4862.47	1.549	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0082	0.61	1.24	1105.71	0.352	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0082	0.61	1.24	180.77	0.058	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0082	0.61	1.24	2502.73	0.797	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0082	0.61	1.24	157.34	0.05	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0082	0.61	1.24	494.81	0.158	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0082	0.61	1.24	772.27	0.246	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0082	0.61	1.24	186.74	0.059	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0082	0.61	1.24	800.87	0.255	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0082	0.61	1.24	1050.49	0.335	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0082	0.61	1.24	280.66	0.089	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0082	0.61	1.24	1056.35	0.337	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0082	0.61	1.24	1424.86	0.454	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0082	0.61	1.24	391.27	0.125	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0082	0.61	1.24	1352.35	0.431	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0082	0.61	1.24	2960.86	0.943	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0082	0.61	1.24	371.87	0.118	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0082	0.61	1.24	235.7	0.075	13.7119



Tabla 34 Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 203 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 203 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	4.5271	-0.62	4.53	0
Junc J-2	2.488	0	3.05	0.57
Junc J-3	2.47	0	2.9	0.43
Junc J-4	2.354	0	2.59	0.23
Junc J-5	2.343	0	2.33	-0.01
Junc J-6	0.264	0	1.95	1.69
Junc J-7	0.263	0	1.78	1.52
Junc J-8	0.257	0	1.5	1.24
Junc J-9	1.501	0	1.19	-0.31
Junc J-10	1.51	0	1.02	-0.49
Junc J-11	1.508	0	0.76	-0.75
Junc J-12	0.892	0	0.54	-0.36
Junc J-13	0.896	0	0.38	-0.51
Junc J-14	0.897	0	0.12	-0.77
Junc J-15	1.265	0	-0.07	-1.33
Junc J-16	1.269	0	-0.21	-1.48
Junc J-17	1.274	0	-0.46	-1.74
Junc J-18	1.245	0	-0.72	-1.96
Junc J-19	0	0.62	-1.66	-1.66

Tabla 35. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 203 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
	Length	Diameter	Roughness	Flow	Velocity	Unit Headloss	Friction Facto	Posicion
Link ID	m	mm		LPS	m/s	m/km		0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0087	0.62	1.27	5515.78	1.674	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0087	0.62	1.27	956.81	0.29	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0087	0.62	1.27	182.13	0.055	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0087	0.62	1.27	2638.44	0.801	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0087	0.62	1.27	162.5	0.049	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0087	0.62	1.27	445.15	0.135	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0087	0.62	1.27	822.3	0.25	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0087	0.62	1.27	187.13	0.057	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0087	0.62	1.27	506.13	0.154	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0087	0.62	1.27	1114.29	0.338	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0087	0.62	1.27	265.79	0.081	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0087	0.62	1.27	915.46	0.278	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0087	0.62	1.27	1507.19	0.458	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0087	0.62	1.27	358.43	0.109	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0087	0.62	1.27	1163.38	0.353	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0087	0.62	1.27	3119.25	0.947	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0087	0.62	1.27	402.06	0.122	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0087	0.62	1.27	259.15	0.079	13.7119



Tabla 36. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 224 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 224 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	4.7311	-0.67	4.73	0
Junc J-2	2.488	0	2.86	0.37
Junc J-3	2.47	0	2.73	0.26
Junc J-4	2.354	0	2.37	0.02
Junc J-5	2.343	0	2.08	-0.27
Junc J-6	0.264	0	1.63	1.37
Junc J-7	0.263	0	1.47	1.21
Junc J-8	0.257	0	1.14	0.88
Junc J-9	1.501	0	0.8	-0.7
Junc J-10	1.51	0	0.64	-0.87
Junc J-11	1.508	0	0.33	-1.18
Junc J-12	0.892	0	0.1	-0.79
Junc J-13	0.896	0	-0.04	-0.93
Junc J-14	0.897	0	-0.34	-1.24
Junc J-15	1.265	0	-0.53	-1.79
Junc J-16	1.269	0	-0.65	-1.92
Junc J-17	1.274	0	-0.95	-2.22
Junc J-18	1.245	0	-1.25	-2.5
Junc J-19	0	0.67	-2.41	-2.41

Tabla 37. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 224 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
Link ID	Length	Diameter	Roughness	Flow	Velocity	Unit Headloss	Friction Facto	Posicion
	m	mm		LPS	m/s	m/km		0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0094	0.67	1.37	7002.15	1.839	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0094	0.67	1.37	840.96	0.221	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0094	0.67	1.37	205.28	0.054	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0094	0.67	1.37	3070.31	0.806	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0094	0.67	1.37	189.17	0.05	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0094	0.67	1.37	421.1	0.111	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0094	0.67	1.37	970.95	0.255	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0094	0.67	1.37	209.38	0.055	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0094	0.67	1.37	471.14	0.124	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0094	0.67	1.37	1308.48	0.344	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0094	0.67	1.37	273.92	0.072	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0094	0.67	1.37	807.03	0.212	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0094	0.67	1.37	1762.65	0.463	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0094	0.67	1.37	349.94	0.092	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0094	0.67	1.37	1010.47	0.265	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0094	0.67	1.37	3626.1	0.952	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0094	0.67	1.37	485.19	0.127	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0094	0.67	1.37	319.99	0.084	13.7119



Tabla 38. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 234 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 234 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	4.7311	-0.67	4.73	0
Junc J-2	2.488	0	2.86	0.37
Junc J-3	2.47	0	2.73	0.26
Junc J-4	2.354	0	2.37	0.02
Junc J-5	2.343	0	2.08	-0.27
Junc J-6	0.264	0	1.63	1.37
Junc J-7	0.263	0	1.47	1.21
Junc J-8	0.257	0	1.14	0.88
Junc J-9	1.501	0	0.8	-0.7
Junc J-10	1.51	0	0.64	-0.87
Junc J-11	1.508	0	0.33	-1.18
Junc J-12	0.892	0	0.1	-0.79
Junc J-13	0.896	0	-0.04	-0.93
Junc J-14	0.897	0	-0.34	-1.24
Junc J-15	1.265	0	-0.53	-1.79
Junc J-16	1.269	0	-0.65	-1.92
Junc J-17	1.274	0	-0.95	-2.22
Junc J-18	1.245	0	-1.25	-2.5
Junc J-19	0	0.67	-2.41	-2.41

Tabla 39. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 234 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
Link ID	Length	Diameter	Roughness	Flow	Velocity	Unit Headloss	Friction Facto	Posicion
	m	mm		LPS	m/s	m/km		0
Pipe T-1	0.2671	25	0.0094	0.67	1.37	7002.15	1.839	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.0094	0.67	1.37	840.96	0.221	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.0094	0.67	1.37	205.28	0.054	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.0094	0.67	1.37	3070.31	0.806	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.0094	0.67	1.37	189.17	0.05	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.0094	0.67	1.37	421.1	0.111	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.0094	0.67	1.37	970.95	0.255	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.0094	0.67	1.37	209.38	0.055	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.0094	0.67	1.37	471.14	0.124	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.0094	0.67	1.37	1308.48	0.344	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.0094	0.67	1.37	273.92	0.072	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.0094	0.67	1.37	807.03	0.212	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.0094	0.67	1.37	1762.65	0.463	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.0094	0.67	1.37	349.94	0.092	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.0094	0.67	1.37	1010.47	0.265	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.0094	0.67	1.37	3626.1	0.952	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.0094	0.67	1.37	485.19	0.127	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.0094	0.67	1.37	319.99	0.084	13.7119



Tabla 40. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 244 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 244 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	5.3381	-0.68	5.34	0
Junc J-2	2.488	0	2.3	-0.18
Junc J-3	2.47	0	2.15	-0.32
Junc J-4	2.354	0	1.55	-0.81
Junc J-5	2.343	0	1.23	-1.11
Junc J-6	0.264	0	0.47	0.2
Junc J-7	0.263	0	0.24	-0.02
Junc J-8	0.257	0	-0.14	-0.4
Junc J-9	1.501	0	-0.71	-2.21
Junc J-10	1.51	0	-0.91	-2.42
Junc J-11	1.508	0	-1.27	-2.78
Junc J-12	0.892	0	-1.61	-2.51
Junc J-13	0.896	0	-1.77	-2.67
Junc J-14	0.897	0	-2.11	-3.01
Junc J-15	1.265	0	-2.37	-3.63
Junc J-16	1.269	0	-2.52	-3.78
Junc J-17	1.274	0	-2.83	-4.1
Junc J-18	1.245	0	-3.22	-4.47
Junc J-19	0	0.68	-4.9	-4.9

Tabla 41. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 244 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
	Length	Diameter	Roughness	Flow	Velocity	Unit Headloss	Friction Facto	Posicion
Link ID	m	mm		LPS	m/s	m/km		0
Pipe T-1	0.2671	25	0.013	0.68	1.38	11358.71	2.907	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.013	0.68	1.38	996.3	0.255	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.013	0.68	1.38	344.02	0.088	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.013	0.68	1.38	3283.84	0.84	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.013	0.68	1.38	327.5	0.084	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.013	0.68	1.38	565.48	0.145	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.013	0.68	1.38	1129.69	0.289	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.013	0.68	1.38	348.23	0.089	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.013	0.68	1.38	616.83	0.158	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.013	0.68	1.38	1476.02	0.378	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.013	0.68	1.38	414.46	0.106	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.013	0.68	1.38	961.48	0.246	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.013	0.68	1.38	1942.05	0.497	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.013	0.68	1.38	492.47	0.126	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.013	0.68	1.38	1170.23	0.3	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.013	0.68	1.38	3854.13	0.986	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.013	0.68	1.38	631.24	0.162	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.013	0.68	1.38	461.73	0.118	13.7119



Tabla 42. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 285 cm EPANET Nodos.

Carga Hidraulica de 285 cm				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	5.3381	-0.71	5.34	0
Junc J-2	2.488	0	1.98	-0.5
Junc J-3	2.47	0	1.81	-0.66
Junc J-4	2.354	0	1.15	-1.21
Junc J-5	2.343	0	0.8	-1.54
Junc J-6	0.264	0	-0.05	-0.31
Junc J-7	0.263	0	-0.29	-0.56
Junc J-8	0.257	0	-0.72	-0.97
Junc J-9	1.501	0	-1.35	-2.85
Junc J-10	1.51	0	-1.57	-3.08
Junc J-11	1.508	0	-1.97	-3.47
Junc J-12	0.892	0	-2.35	-3.24
Junc J-13	0.896	0	-2.52	-3.42
Junc J-14	0.897	0	-2.9	-3.79
Junc J-15	1.265	0	-3.18	-4.45
Junc J-16	1.269	0	-3.35	-4.61
Junc J-17	1.274	0	-3.69	-4.96
Junc J-18	1.245	0	-4.13	-5.37
Junc J-19	0	0.71	-5.98	-5.98

Tabla 43. Resultados de Simulación Carga Hidráulica de 285 cm EPANET Tuberías.

Network Table - Links at 0:00 Hrs								
	Length	Diameter	Roughness	Flow	Velocity	Unit Headloss	Friction Facto	Posicion
Link ID	m	mm		LPS	m/s	m/km		0
Pipe T-1	0.2671	25	0.013	0.71	1.46	12558.62	2.907	0.2671
Pipe T-2	0.1567	25	0.013	0.71	1.46	1101.55	0.255	0.4238
Pipe T-3	1.742	25	0.013	0.71	1.46	380.37	0.088	2.1658
Pipe T-4	0.0959	25	0.013	0.71	1.46	3630.73	0.84	2.2617
Pipe T-5	2.3424	25	0.013	0.71	1.46	362.09	0.084	4.6041
Pipe T-6	0.3928	25	0.013	0.71	1.46	625.22	0.145	4.9969
Pipe T-7	0.3389	25	0.013	0.71	1.46	1249.02	0.289	5.3358
Pipe T-8	1.6353	25	0.013	0.71	1.46	385.02	0.089	6.9711
Pipe T-9	0.333	25	0.013	0.71	1.46	681.99	0.158	7.3041
Pipe T-10	0.2408	25	0.013	0.71	1.46	1631.95	0.378	7.5449
Pipe T-11	0.8325	25	0.013	0.71	1.46	458.24	0.106	8.3774
Pipe T-12	0.1647	25	0.013	0.71	1.46	1063.05	0.246	8.5421
Pipe T-13	0.1733	25	0.013	0.71	1.46	2147.2	0.497	8.7154
Pipe T-14	0.5275	25	0.013	0.71	1.46	544.49	0.126	9.2429
Pipe T-15	0.1261	25	0.013	0.71	1.46	1293.85	0.3	9.369
Pipe T-16	0.0806	25	0.013	0.71	1.46	4261.27	0.986	9.4496
Pipe T-17	0.6276	25	0.013	0.71	1.46	697.92	0.162	10.0772
Pipe T-18	3.6347	25	0.013	0.71	1.46	510.5	0.118	13.7119



Como se mencionó en párrafos arriba se realizó el cálculo matemático en el programa EPANET, de los cuales los resultados se presentaron en las tablas ya mostradas. El programa genera archivos de datos, que son compatibles con el programa Excel, para el tratamiento de los resultados y la elaboración de esquemas y gráficas para la mejor comprensión de los resultados.

En resumen de los resultados de la simulación del comportamiento piezométrico y del flujo de las mediciones concernientes a los datos del experimento, se presentan resumidas en la Tabla 44, a continuación, así como en la gráfica 10, se muestra el perfil del experimento y las líneas piezométricas, las cuales en algunas simulaciones se encuentran por debajo del perfil del terreno natural, lo cual esto no debería estar pasando y esto nos diría que el flujo que transita por el modelo no llegaría a su final para desalojar el gasto de entra, por tal motivo los cálculos de simulación en EPANET no son del todo exactos para estas situaciones.

Tabla 44. Resumen de Cargas Hidráulicas en Simulación en EPANET.

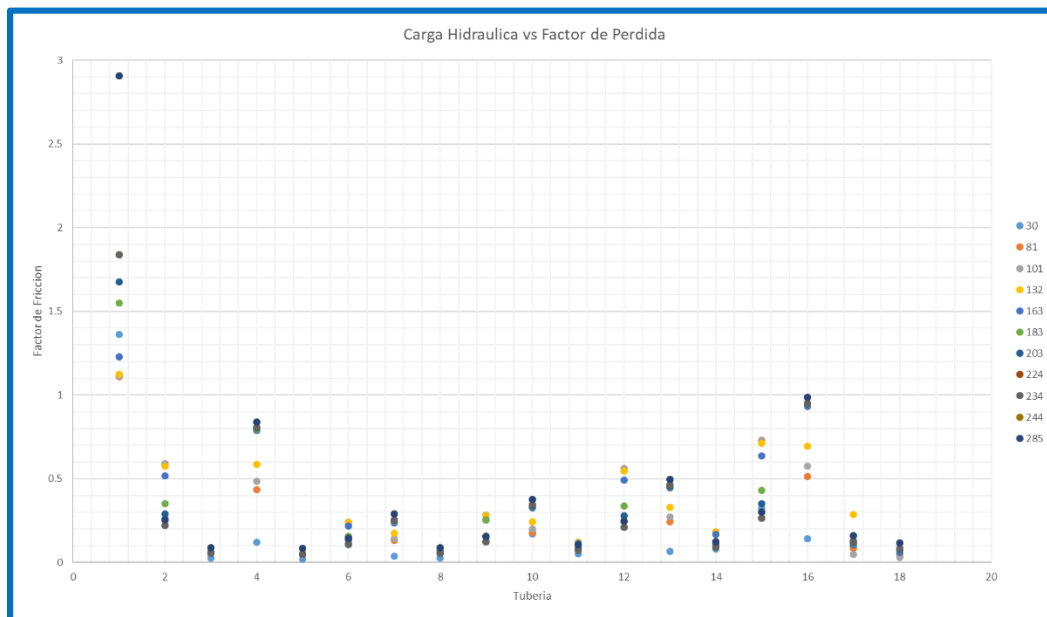
	Carga cm	30	81	101	132	163	183	203	224	234	244	285
	Q lps	0.25	0.45	0.45	0.51	0.55	0.61	0.62	0.67	0.67	0.68	0.71
Elevation	Posicion	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
2.4881	0	2.79	3.3	3.5	3.81	4.12	4.32	4.53	4.73	4.73	5.34	5.34
2.488	0.2671	2.6	2.8	3	3.15	3.27	3.02	3.05	2.86	2.86	2.3	2.3
2.47	0.4238	2.58	2.64	2.84	2.95	3.06	2.85	2.9	2.73	2.73	2.15	2.15
2.354	2.1658	2.56	2.46	2.67	2.7	2.78	2.53	2.59	2.37	2.37	1.55	1.55
2.343	2.2617	2.55	2.38	2.59	2.57	2.58	2.29	2.33	2.08	2.08	1.23	1.23
0.264	4.6041	2.53	2.19	2.4	2.31	2.27	1.92	1.95	1.63	1.63	0.47	0.47
0.263	4.9969	2.51	2.03	2.24	2.1	2.05	1.73	1.78	1.47	1.47	0.24	0.24
0.257	5.3358	2.5	1.96	2.16	1.97	1.84	1.47	1.5	1.14	1.14	-0.14	-0.14
1.501	6.9711	2.48	1.77	1.98	1.72	1.56	1.16	1.19	0.8	0.8	-0.71	-0.71
1.51	7.3041	2.45	1.61	1.82	1.51	1.34	0.89	1.02	0.64	0.64	-0.91	-0.91
1.508	7.5449	2.43	1.54	1.74	1.38	1.14	0.64	0.76	0.33	0.33	-1.27	-1.27
0.892	8.3774	2.41	1.37	1.58	1.16	0.9	0.41	0.54	0.1	0.1	-1.61	-1.61
0.896	8.5421	2.39	1.21	1.42	0.96	0.69	0.23	0.38	-0.04	-0.04	-1.77	-1.77
0.897	8.7154	2.38	1.14	1.34	0.84	0.49	-0.01	0.12	-0.34	-0.34	-2.11	-2.11
1.265	9.2429	2.36	0.98	1.18	0.62	0.26	-0.22	-0.07	-0.53	-0.53	-2.37	-2.37
1.269	9.369	2.34	0.82	1.03	0.42	0.05	-0.39	-0.21	-0.65	-0.65	-2.52	-2.52
1.274	9.4496	2.33	0.75	0.95	0.3	-0.14	-0.63	-0.46	-0.95	-0.95	-2.83	-2.83
1.245	10.0772	2.31	0.66	0.9	-0.1	-0.32	-0.86	-0.72	-1.25	-1.25	-3.22	-3.22
0.002	13.7119	2.21	0.36	0.71	-0.59	-0.89	-1.72	-1.66	-2.41	-2.41	-4.9	-4.9

Esto se debe a que a mayor gasto en los cálculos se provoca mayor pérdida tanto por fricción y pérdidas locales, y se ve reflejado en la tubería y en los nodos, a continuación, se muestran tablas de datos e Histogramas de cada elemento para su mayor comprensión.



Tabla 45. Resumen de Factores de Fricción en Simulación en EPANET.

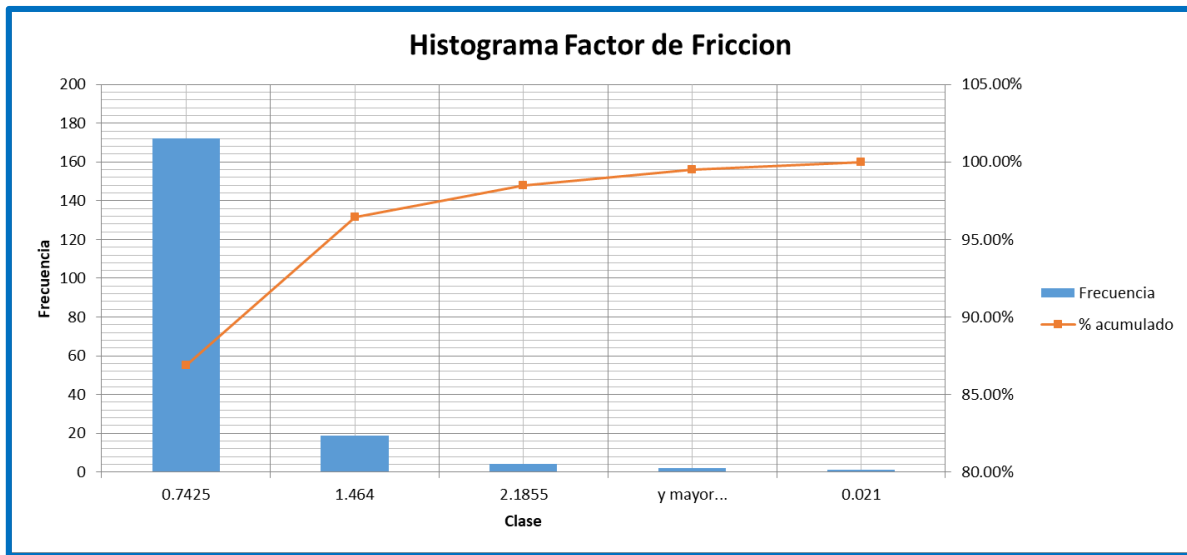
Carga cm	30	81	101	132	163	183	203	224	234	244	285
Factor Friccion											
Posicion	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Pipe T-1	1.363	1.109	1.113	1.123	1.229	1.549	1.674	1.839	1.839	2.907	2.907
Pipe T-2	0.26	0.59	0.588	0.575	0.516	0.352	0.29	0.221	0.221	0.255	0.255
Pipe T-3	0.026	0.062	0.061	0.064	0.063	0.058	0.055	0.054	0.054	0.088	0.088
Pipe T-4	0.121	0.434	0.486	0.587	0.787	0.797	0.801	0.806	0.806	0.84	0.84
Pipe T-5	0.021	0.048	0.048	0.051	0.052	0.05	0.049	0.05	0.05	0.084	0.084
Pipe T-6	0.106	0.241	0.24	0.238	0.217	0.158	0.135	0.111	0.111	0.145	0.145
Pipe T-7	0.037	0.13	0.144	0.176	0.236	0.246	0.25	0.255	0.255	0.289	0.289
Pipe T-8	0.028	0.065	0.065	0.068	0.066	0.059	0.057	0.055	0.055	0.089	0.089
Pipe T-9	0.124	0.283	0.282	0.278	0.253	0.255	0.154	0.124	0.124	0.158	0.158
Pipe T-10	0.17	0.179	0.199	0.242	0.325	0.335	0.338	0.344	0.344	0.378	0.378
Pipe T-11	0.052	0.119	0.118	0.119	0.112	0.089	0.081	0.072	0.072	0.106	0.106
Pipe T-12	0.248	0.562	0.56	0.548	0.492	0.337	0.278	0.212	0.212	0.246	0.246
Pipe T-13	0.068	0.244	0.273	0.331	0.444	0.454	0.458	0.463	0.463	0.497	0.497
Pipe T-14	0.08	0.182	0.181	0.181	0.166	0.125	0.109	0.092	0.092	0.126	0.126
Pipe T-15	0.322	0.731	0.729	0.712	0.637	0.431	0.353	0.265	0.265	0.3	0.3
Pipe T-16	0.143	0.515	0.577	0.696	0.933	0.943	0.947	0.952	0.952	0.986	0.986
Pipe T-17	0.091	0.083	0.05	0.287	0.108	0.118	0.122	0.127	0.127	0.162	0.162
Pipe T-18	0.048	0.048	0.031	0.06	0.06	0.075	0.079	0.084	0.084	0.118	0.118



Grafica 10. Carga Hidráulica vs Factor de Pérdida EPANET.

Tabla 46. Histograma de Factores de Pérdidas EPANET.

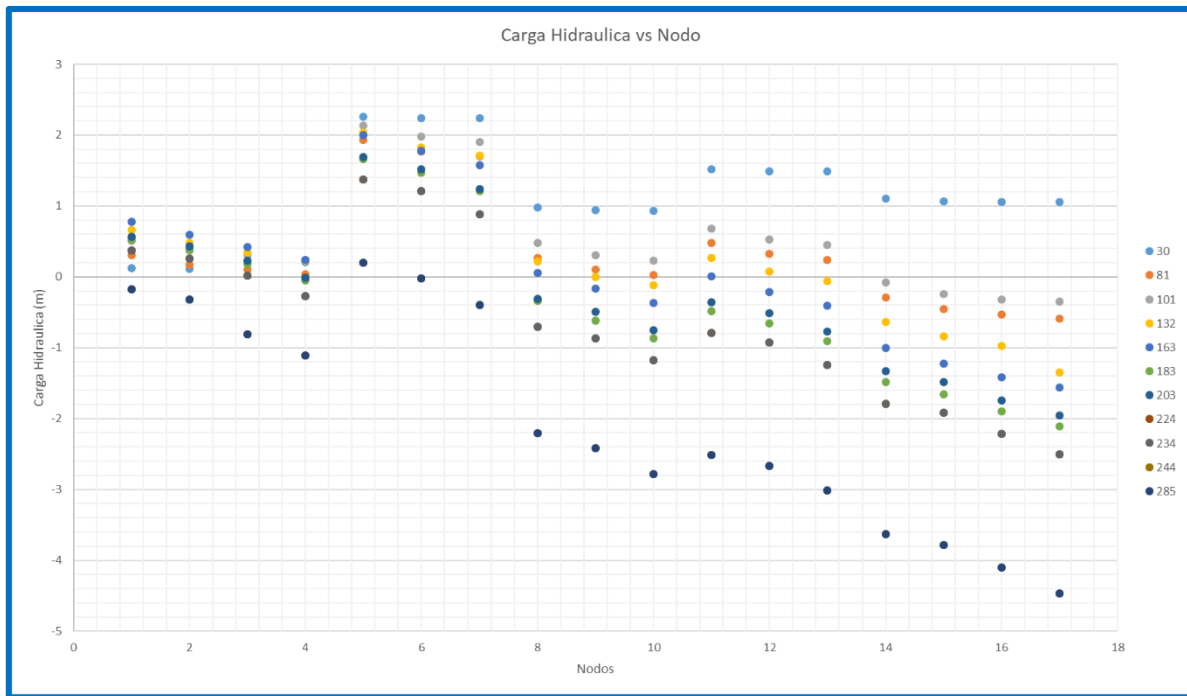
Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado
0.021	1	0.51%	0.7425	172	86.87%
0.7425	172	87.37%	1.464	19	96.46%
1.464	19	96.97%	2.1855	4	98.48%
2.1855	4	98.99%	y mayor...	2	99.49%
y mayor...	2	100.00%	0.021	1	100.00%



Gráfica 11 Histograma de Factor de Ficción Simulado EPANET.

Tabla 47. Resumen de Cargas Hidráulicas en los Nodos en Simulación en EPANET.

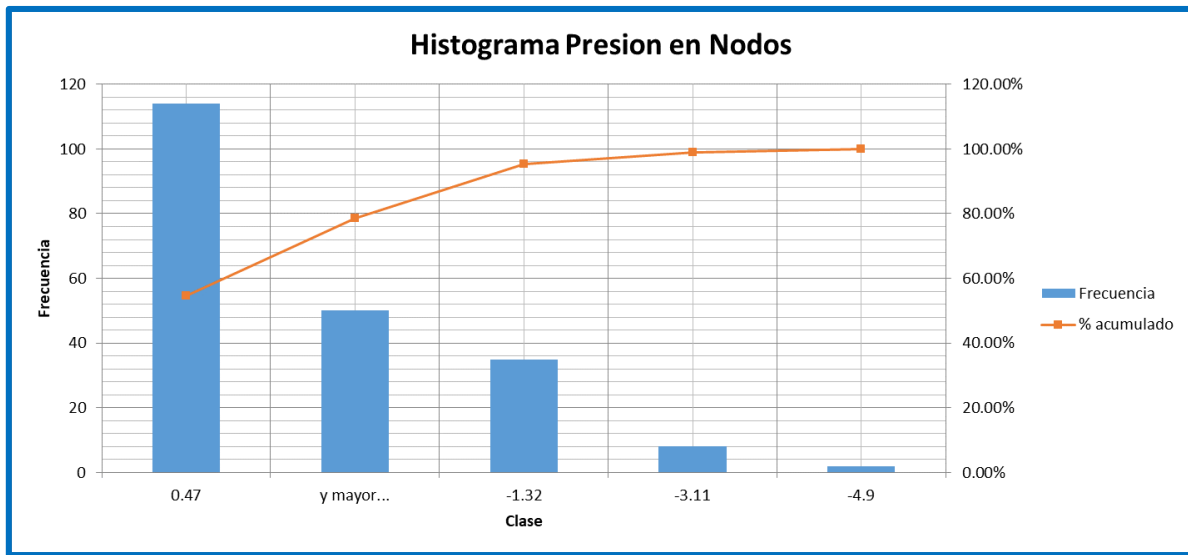
Carga cm	30	81	101	132	163	183	203	224	234	244	285
Head Nodo											
Posicion	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Resvr Aliment	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junc J-2	0.12	0.31	0.51	0.66	0.78	0.53	0.57	0.37	0.37	-0.18	-0.18
Junc J-3	0.11	0.17	0.37	0.48	0.59	0.38	0.43	0.26	0.26	-0.32	-0.32
Junc J-4	0.21	0.1	0.31	0.34	0.42	0.18	0.23	0.02	0.02	-0.81	-0.81
Junc J-5	0.21	0.04	0.24	0.23	0.24	-0.05	-0.01	-0.27	-0.27	-1.11	-1.11
Junc J-6	2.26	1.93	2.13	2.04	2	1.66	1.69	1.37	1.37	0.2	0.2
Junc J-7	2.24	1.77	1.98	1.83	1.78	1.47	1.52	1.21	1.21	-0.02	-0.02
Junc J-8	2.24	1.7	1.9	1.71	1.58	1.21	1.24	0.88	0.88	-0.4	-0.4
Junc J-9	0.98	0.27	0.48	0.22	0.06	-0.34	-0.31	-0.7	-0.7	-2.21	-2.21
Junc J-10	0.94	0.1	0.31	0	-0.17	-0.62	-0.49	-0.87	-0.87	-2.42	-2.42
Junc J-11	0.93	0.03	0.23	-0.12	-0.37	-0.87	-0.75	-1.18	-1.18	-2.78	-2.78
Junc J-12	1.52	0.48	0.68	0.27	0.01	-0.48	-0.36	-0.79	-0.79	-2.51	-2.51
Junc J-13	1.49	0.32	0.53	0.07	-0.21	-0.66	-0.51	-0.93	-0.93	-2.67	-2.67
Junc J-14	1.49	0.24	0.45	-0.06	-0.41	-0.91	-0.77	-1.24	-1.24	-3.01	-3.01
Junc J-15	1.1	-0.29	-0.08	-0.64	-1	-1.48	-1.33	-1.79	-1.79	-3.63	-3.63
Junc J-16	1.07	-0.45	-0.24	-0.84	-1.22	-1.66	-1.48	-1.92	-1.92	-3.78	-3.78
Junc J-17	1.06	-0.53	-0.32	-0.97	-1.42	-1.9	-1.74	-2.22	-2.22	-4.1	-4.1
Junc J-18	1.06	-0.59	-0.35	-1.35	-1.56	-2.11	-1.96	-2.5	-2.5	-4.47	-4.47
Junc J-19	2.21	0.36	0.71	-0.59	-0.89	-1.72	-1.66	-2.41	-2.41	-4.9	-4.9



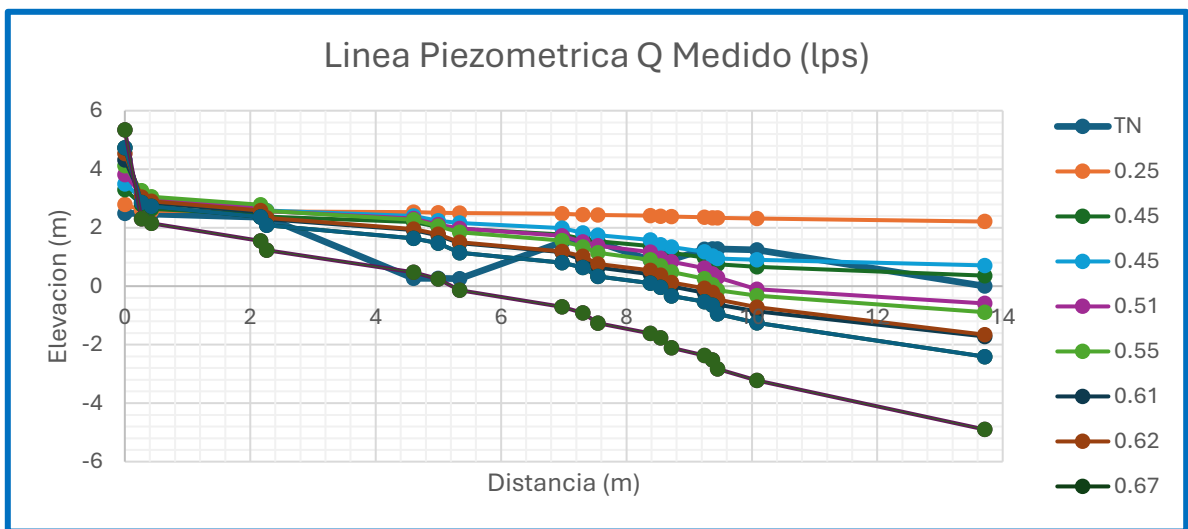
Grafica 12. Carga Hidráulica vs Nodo EPANET.

Tabla 48. Histograma de Simulación de Cargas Hidráulicas en Nodos EPANET.

Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado
-4.9	2	0.96%	0.47	114	54.55%
-3.11	8	4.78%	y mayor...	50	78.47%
-1.32	35	21.53%	-1.32	35	95.22%
0.47	114	76.08%	-3.11	8	99.04%
y mayor...	50	100.00%	-4.9	2	100.00%



Gráfica 13. Histograma Presión en Nodos EPANET..

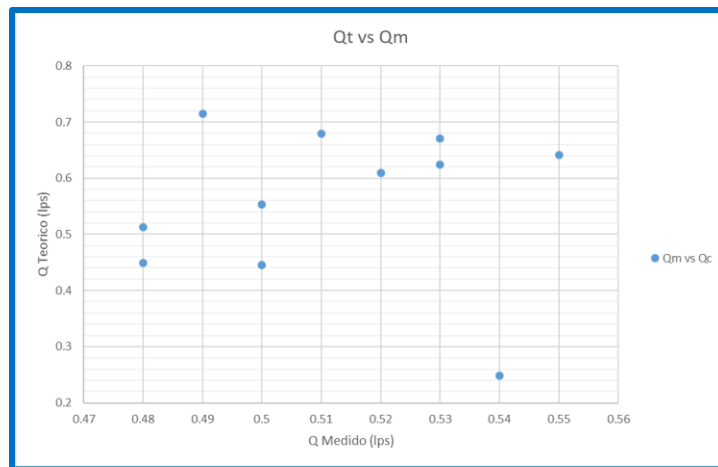


Gráfica 14. Líneas Piezométricas Simuladas con el Gasto Medido EPANET.

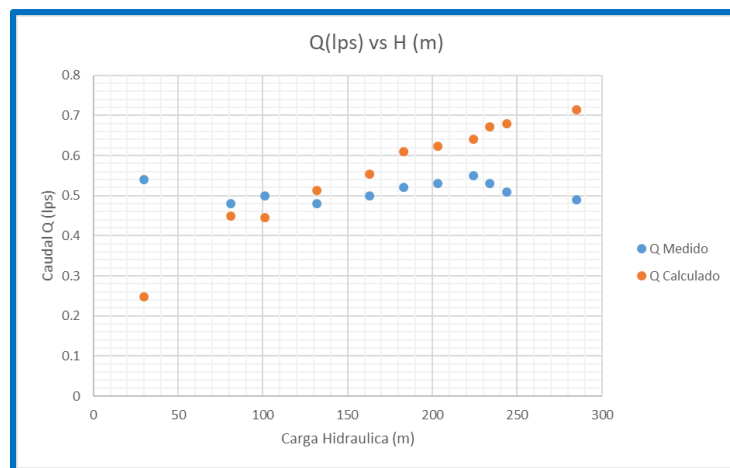


Tabla 49. Resumen de Gastos Teórico vs Medido.

Carga Hidraulica	Teorico		Medido	
	Q (lps)	Vel (m/s)	Q (lps)	Vel (m/s)
30	0.54	1.11	0.2481343	0.50549504
81	0.48	0.97	0.44941078	0.91553213
101	0.5	1.02	0.44541695	0.90954568
132	0.48	0.97	0.51265501	1.04632401
163	0.5	1.02	0.55327496	1.1271225
183	0.52	1.05	0.60924361	1.24114089
203	0.53	1.09	0.62416537	1.27153924
224	0.55	1.11	0.64074069	1.30530622
234	0.53	1.08	0.67108601	1.36712518
244	0.51	1.05	0.67970974	1.38469332
285	0.49	1	0.71478642	1.45615094



Grafica 15. Gasto Medido vs Gasto Teórico.



Grafica 16. Gasto Teórico y Medido vs Carga Hidráulica Inicial.



Se observa que, aunque existen diferencias entre los valores tanto de gasto como velocidad, sin embargo, los resultados no son muy acertados, con lo que se confirma la validez del modelo matemático para predecir el cálculo de la velocidad, pero también es claro que la línea piezométrica que nos representa de cierta forma las pérdidas que se van teniendo a lo largo del sistema no concuerda con la realidad del modelo experimental.

Los resultados fueron analizados y presentados en las gráficas y tablas anteriores, donde se muestran en forma un tanto cualitativa el cálculo hidráulico en base a los parámetros obtenidos. Debido a que, en el estudio presentado aquí, se experimentó con un conducto de pendiente fija, no es posible realizar comparación alguna con una en la vida real.

5.4 Simulación en Storm Water Management Model (SWMM)

El Storm Water Management Model (SWMM) es un modelo computacional desarrollado por la United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) para la simulación hidrológica, hidráulica y de calidad del agua en sistemas de drenaje urbano, alcantarillado combinado, alcantarillado sanitario, redes pluviales y otros sistemas de conducción. El programa permite realizar simulaciones para eventos individuales o periodos continuos, representando el escurrimiento superficial, la generación de caudales y su tránsito a través de conductos, canales, nodos, unidades de almacenamiento, bombas, vertedores, orificios y otros elementos hidráulicos (Rossman & Simon, 2022)

El modelo de flujo uniforme representa la forma más simple de representar el comportamiento del agua en el interior de los conductos. Para ello se asume que en cada uno de los incrementos de tiempo de cálculo considerados el flujo es uniforme. De esta forma el modelo simplemente traslada los hidrogramas de entrada en el nudo aguas arriba del conducto hacia el nudo final del mismo, con un cierto retardo y cambio en el aspecto del mismo. Para relacionar el caudal con el área y el calado en el conducto se emplea la ecuación de Manning.



Este tipo de modelo hidráulico no puede tener en cuenta el almacenamiento de agua que se produce en los conductos, los fenómenos de resalto hidráulico las pérdidas a la entrada y salida de los pozos de registro, el flujo inverso o los fenómenos de flujo presurizado. Solo puede utilizarse en sistemas ramificados, donde cada uno de los nudos tiene únicamente una única línea hacia la que vierte sus aguas (a menos que el nudo sea un divisor en cuyo caso requiere de dos tuberías de salida). Este modelo de análisis es insensible al incremento de tiempo seleccionado y únicamente es apropiado para realizar análisis preliminares utilizando simulaciones continuas de escalas de tiempo grandes.

5.4.1 Onda Dinámica

El modelo de transporte de la Onda Dinámica (*Dynamic Wave Routing*) resuelve las ecuaciones completas unidimensionales de Saint Venant y por tanto teóricamente genera los resultados más precisos. Estas ecuaciones suponen la aplicación de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento en las conducciones y la continuidad de los volúmenes en los nudos (Rossman & Simon, 2022).

Con este tipo de modelo de transporte es posible representar el flujo presurizado cuando una conducción cerrada se encuentra completamente llena, de forma que el caudal que circula por la misma puede exceder del valor de caudal a tubo completamente lleno obtenido mediante la ecuación de Manning. Las inundaciones ocurren en el sistema cuando la profundidad (calado) del agua en los nudos excede el valor máximo disponible en los mismos. Este exceso de caudal bien puede perderse o bien puede generar un estancamiento en la parte superior del nudo y volver a entrar al sistema de saneamiento posteriormente.

El modelo de transporte de la Onda Dinámica puede contemplar efectos como el almacenamiento en los conductos, los resaltos hidráulicos, las pérdidas en las entradas y salidas de los pozos de registro, el flujo inverso y el flujo presurizado. Dado que resuelve de forma simultánea los valores de los niveles de agua en los nudos y los caudales en las conducciones puede aplicarse para cualquier tipo de configuración de red de saneamiento,



incluso en el caso de que contengan nudos con múltiples divisiones del flujo aguas abajo del mismo o incluso mallas en su trazado.

Se trata del método de resolución adecuado para sistemas en los que los efectos de resalto hidráulico, originados por las restricciones del flujo aguas abajo y la presencia de elementos de regulación tales como orificios y vertederos, sean importantes. El precio que generalmente es necesario pagar por el empleo de este método es la necesidad de utilizar incrementos de tiempo de cálculo mucho más pequeños, del orden de 1 minuto o menos. Durante el cálculo SWMM reducirá automáticamente el incremento de tiempo de cálculo máximo definido por el usuario si es necesario para mantener la estabilidad numérica del análisis.

5.5 Resultados del Cálculo de la Simulación Matemática en SWMM

Con el objeto de comprobar la validez de los modelos matemáticos, se realizaron una serie de simulaciones con las cargas hidráulicas propuesta en los registros experimentales. Las condiciones iniciales para la simulación de cada evento son las que se obtuvieron que se indican en cada tabla que se muestra a continuación.

A continuación, se presentan todos los resultados de las simulaciones con los gastos medidos para determinar los parámetros hidráulicos del modelo y mediciones piezométricas:

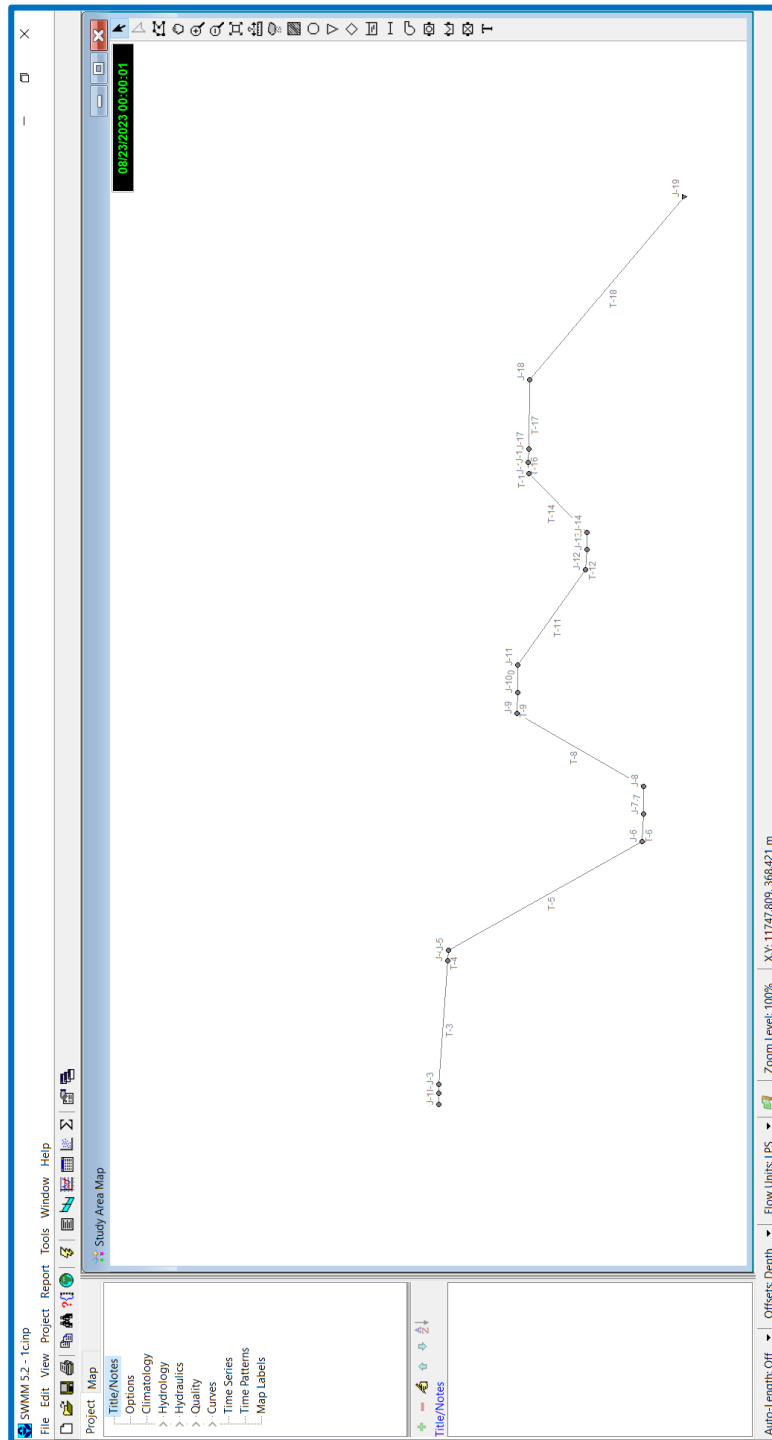


Figura 27. Modelo de Simulación SWMM.

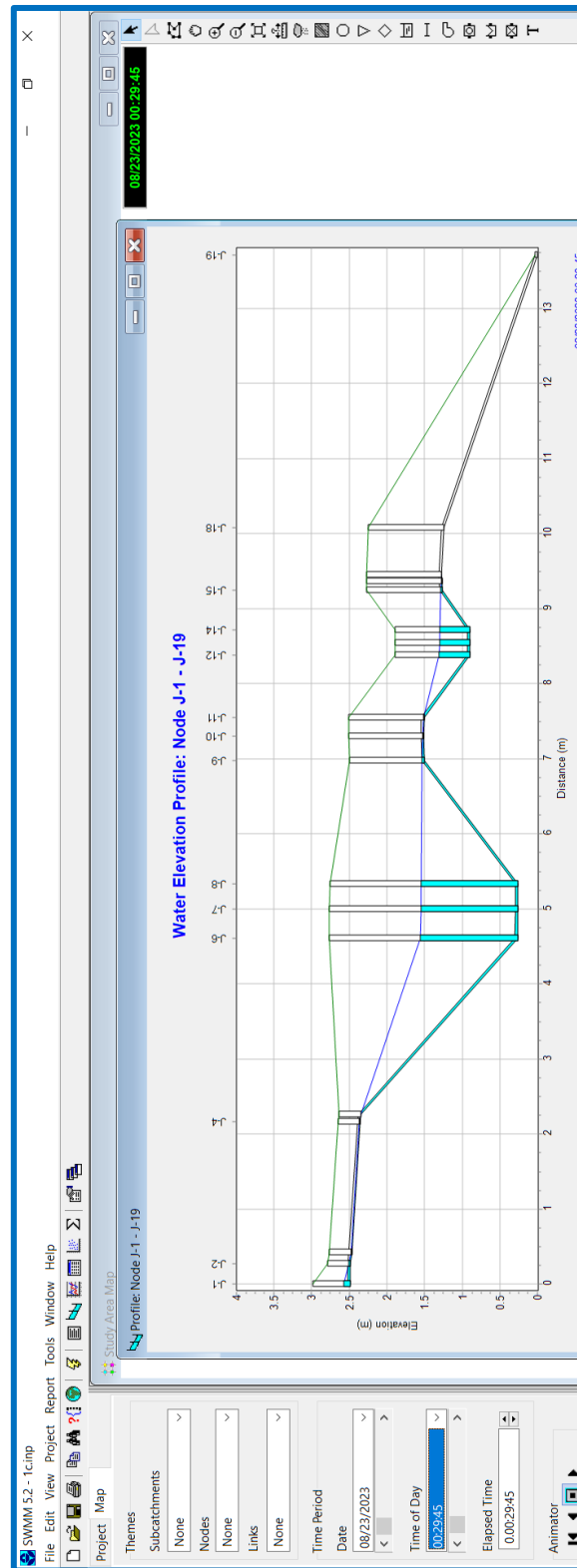


Figura 28. Perfil de simulación en SWMM.



Se realizaron 11 simulaciones con los datos de las pruebas experimentales con sus diferentes cargas hidráulicas iniciales controladas por la válvula al inicio del modelo para dar una presión inicial en el sistema. Cada simulación consistió en recrear los datos del experimento tanto en carga inicial como las pérdidas locales y fricción calculadas con las ecuaciones en el capítulo anterior para tener un mejor comportamiento de la simulación y poder recrear con mayor veracidad los cálculos.

Todas las simulaciones se recrearon en el software SWMM en el modo de onda dinámica la cual nos da la oportunidad de hacer modelos en periodos extendidos o transitorios pasando de sistemas a presión a sistemas a gravedad y viceversa para una mejor comprensión de los calculo.

En las siguientes páginas se incluyen las tablas (50 a 60) y graficas de los registros obtenidos por las simulaciones. Así también se han obtenido los histogramas de los resultados.

Tabla 50. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 30 cm en SWMM.

30 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.2481	2.57	0.082
Junc J-2	2.488	0.2481	2.5	0.012
Junc J-3	2.47	0.2481	2.48	0.01
Junc J-4	2.354	0.2481	2.37	0.016
Junc J-5	2.343	0.2481	2.35	0.007
Junc J-6	0.264	0.2481	1.57	1.306
Junc J-7	0.263	0.2481	1.56	1.297
Junc J-8	0.257	0.2481	1.56	1.303
Junc J-9	1.501	0.2481	1.54	0.039
Junc J-10	1.51	0.2481	1.53	0.02
Junc J-11	1.508	0.2481	1.52	0.012
Junc J-12	0.892	0.2481	1.32	0.428
Junc J-13	0.896	0.2481	1.31	0.414
Junc J-14	0.897	0.2481	1.31	0.413
Junc J-15	1.265	0.2481	1.3	0.035
Junc J-16	1.269	0.2481	1.29	0.021
Junc J-17	1.274	0.2481	1.29	0.016
Junc J-18	1.245	0.2481	1.25	0.005
Resvr Salida	0.002	0.2481	0.01	0.008



Tabla 51. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 81 cm en SWMM.

81 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.4494	2.7	0.212
Junc J-2	2.488	0.4494	2.51	0.022
Junc J-3	2.47	0.4494	2.49	0.02
Junc J-4	2.354	0.4494	2.37	0.016
Junc J-5	2.343	0.4494	2.35	0.007
Junc J-6	0.264	0.4494	1.62	1.356
Junc J-7	0.263	0.4494	1.6	1.337
Junc J-8	0.257	0.4494	1.6	1.343
Junc J-9	1.501	0.4494	1.56	0.059
Junc J-10	1.51	0.4494	1.53	0.02
Junc J-11	1.508	0.4494	1.52	0.012
Junc J-12	0.892	0.4494	1.37	0.478
Junc J-13	0.896	0.4494	1.35	0.454
Junc J-14	0.897	0.4494	1.35	0.453
Junc J-15	1.265	0.4494	1.33	0.065
Junc J-16	1.269	0.4494	1.31	0.041
Junc J-17	1.274	0.4494	1.3	0.026
Junc J-18	1.245	0.4494	1.25	0.005
Resvr Salida	0.002	0.4494	0.01	0.008

Tabla 52. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 101 cm en SWMM.

101 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.4454	2.68	0.192
Junc J-2	2.488	0.4454	2.54	0.052
Junc J-3	2.47	0.4454	2.49	0.02
Junc J-4	2.354	0.4454	2.38	0.026
Junc J-5	2.343	0.4454	2.35	0.007
Junc J-6	0.264	0.4454	1.72	1.456
Junc J-7	0.263	0.4454	1.67	1.407
Junc J-8	0.257	0.4454	1.65	1.393
Junc J-9	1.501	0.4454	1.6	0.099
Junc J-10	1.51	0.4454	1.56	0.05
Junc J-11	1.508	0.4454	1.54	0.032
Junc J-12	0.892	0.4454	1.48	0.588
Junc J-13	0.896	0.4454	1.43	0.534
Junc J-14	0.897	0.4454	1.41	0.513
Junc J-15	1.265	0.4454	1.37	0.105
Junc J-16	1.269	0.4454	1.32	0.051
Junc J-17	1.274	0.4454	1.3	0.026
Junc J-18	1.245	0.4454	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.4454	0.01	0.008



Tabla 53. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 132 cm en SWMM.

132 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.5126	2.75	0.262
Junc J-2	2.488	0.5126	2.55	0.062
Junc J-3	2.47	0.5126	2.49	0.02
Junc J-4	2.354	0.5126	2.39	0.036
Junc J-5	2.343	0.5126	2.36	0.017
Junc J-6	0.264	0.5126	1.85	1.586
Junc J-7	0.263	0.5126	1.79	1.527
Junc J-8	0.257	0.5126	1.76	1.503
Junc J-9	1.501	0.5126	1.69	0.189
Junc J-10	1.51	0.5126	1.63	0.12
Junc J-11	1.508	0.5126	1.6	0.092
Junc J-12	0.892	0.5126	1.54	0.648
Junc J-13	0.896	0.5126	1.48	0.584
Junc J-14	0.897	0.5126	1.45	0.553
Junc J-15	1.265	0.5126	1.39	0.125
Junc J-16	1.269	0.5126	1.33	0.061
Junc J-17	1.274	0.5126	1.3	0.026
Junc J-18	1.245	0.5126	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.5126	0.01	0.008

Tabla 54. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 163 cm en SWMM.

163 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.5532	2.81	0.322
Junc J-2	2.488	0.5532	2.56	0.072
Junc J-3	2.47	0.5532	2.5	0.03
Junc J-4	2.354	0.5532	2.42	0.066
Junc J-5	2.343	0.5532	2.36	0.017
Junc J-6	0.264	0.5532	1.99	1.726
Junc J-7	0.263	0.5532	1.93	1.667
Junc J-8	0.257	0.5532	1.87	1.613
Junc J-9	1.501	0.5532	1.79	0.289
Junc J-10	1.51	0.5532	1.73	0.22
Junc J-11	1.508	0.5532	1.67	0.162
Junc J-12	0.892	0.5532	1.61	0.718
Junc J-13	0.896	0.5532	1.55	0.654
Junc J-14	0.897	0.5532	1.49	0.593
Junc J-15	1.265	0.5532	1.43	0.165
Junc J-16	1.269	0.5532	1.37	0.101
Junc J-17	1.274	0.5532	1.31	0.036
Junc J-18	1.245	0.5532	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.5532	0.01	0.008



Tabla 55. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 183 cm en SWMM.

183 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.6092	2.93	0.442
Junc J-2	2.488	0.6092	2.55	0.062
Junc J-3	2.47	0.6092	2.5	0.03
Junc J-4	2.354	0.6092	2.43	0.076
Junc J-5	2.343	0.6092	2.36	0.017
Junc J-6	0.264	0.6092	2.01	1.746
Junc J-7	0.263	0.6092	1.95	1.687
Junc J-8	0.257	0.6092	1.88	1.623
Junc J-9	1.501	0.6092	1.81	0.309
Junc J-10	1.51	0.6092	1.75	0.24
Junc J-11	1.508	0.6092	1.68	0.172
Junc J-12	0.892	0.6092	1.62	0.728
Junc J-13	0.896	0.6092	1.57	0.674
Junc J-14	0.897	0.6092	1.5	0.603
Junc J-15	1.265	0.6092	1.44	0.175
Junc J-16	1.269	0.6092	1.4	0.131
Junc J-17	1.274	0.6092	1.33	0.056
Junc J-18	1.245	0.6092	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.6092	0.01	0.008

Tabla 56. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 203 cm en SWMM.

203 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.6241	2.97	0.482
Junc J-2	2.488	0.6241	2.54	0.052
Junc J-3	2.47	0.6241	2.5	0.03
Junc J-4	2.354	0.6241	2.43	0.076
Junc J-5	2.343	0.6241	2.36	0.017
Junc J-6	0.264	0.6241	1.99	1.726
Junc J-7	0.263	0.6241	1.95	1.687
Junc J-8	0.257	0.6241	1.87	1.613
Junc J-9	1.501	0.6241	1.8	0.299
Junc J-10	1.51	0.6241	1.75	0.24
Junc J-11	1.508	0.6241	1.68	0.172
Junc J-12	0.892	0.6241	1.63	0.738
Junc J-13	0.896	0.6241	1.58	0.684
Junc J-14	0.897	0.6241	1.51	0.613
Junc J-15	1.265	0.6241	1.46	0.195
Junc J-16	1.269	0.6241	1.42	0.151
Junc J-17	1.274	0.6241	1.35	0.076
Junc J-18	1.245	0.6241	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.6241	0.01	0.008



Tabla 57. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 224 cm en SWMM.

224 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.6407	2.99	0.502
Junc J-2	2.488	0.6407	2.53	0.042
Junc J-3	2.47	0.6407	2.5	0.03
Junc J-4	2.354	0.6407	2.43	0.076
Junc J-5	2.343	0.6407	2.36	0.017
Junc J-6	0.264	0.6407	1.91	1.646
Junc J-7	0.263	0.6407	1.88	1.617
Junc J-8	0.257	0.6407	1.8	1.543
Junc J-9	1.501	0.6407	1.73	0.229
Junc J-10	1.51	0.6407	1.7	0.19
Junc J-11	1.508	0.6407	1.62	0.112
Junc J-12	0.892	0.6407	1.58	0.688
Junc J-13	0.896	0.6407	1.55	0.654
Junc J-14	0.897	0.6407	1.47	0.573
Junc J-15	1.265	0.6407	1.43	0.165
Junc J-16	1.269	0.6407	1.4	0.131
Junc J-17	1.274	0.6407	1.33	0.056
Junc J-18	1.245	0.6407	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.6407	0.01	0.008

Tabla 58. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 234 cm en SWMM.

234 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.671	2.99	0.502
Junc J-2	2.488	0.671	2.53	0.042
Junc J-3	2.47	0.671	2.5	0.03
Junc J-4	2.354	0.671	2.43	0.076
Junc J-5	2.343	0.671	2.36	0.017
Junc J-6	0.264	0.671	1.91	1.646
Junc J-7	0.263	0.671	1.88	1.617
Junc J-8	0.257	0.671	1.8	1.543
Junc J-9	1.501	0.671	1.73	0.229
Junc J-10	1.51	0.671	1.7	0.19
Junc J-11	1.508	0.671	1.62	0.112
Junc J-12	0.892	0.671	1.58	0.688
Junc J-13	0.896	0.671	1.55	0.654
Junc J-14	0.897	0.671	1.47	0.573
Junc J-15	1.265	0.671	1.43	0.165
Junc J-16	1.269	0.671	1.4	0.131
Junc J-17	1.274	0.671	1.33	0.056
Junc J-18	1.245	0.671	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.671	0.01	0.008



Tabla 59. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 244 cm en SWMM.

244 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.6797	2.99	0.502
Junc J-2	2.488	0.6797	2.52	0.032
Junc J-3	2.47	0.6797	2.49	0.02
Junc J-4	2.354	0.6797	2.4	0.046
Junc J-5	2.343	0.6797	2.35	0.007
Junc J-6	0.264	0.6797	1.72	1.456
Junc J-7	0.263	0.6797	1.69	1.427
Junc J-8	0.257	0.6797	1.64	1.383
Junc J-9	1.501	0.6797	1.6	0.099
Junc J-10	1.51	0.6797	1.58	0.07
Junc J-11	1.508	0.6797	1.53	0.022
Junc J-12	0.892	0.6797	1.47	0.578
Junc J-13	0.896	0.6797	1.45	0.554
Junc J-14	0.897	0.6797	1.4	0.503
Junc J-15	1.265	0.6797	1.37	0.105
Junc J-16	1.269	0.6797	1.35	0.081
Junc J-17	1.274	0.6797	1.31	0.036
Junc J-18	1.245	0.6797	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.6797	0.01	0.008

Tabla 60. Resultados de Simulación en Nodos Carga Hidráulica de 285 cm en SWMM.

285 cm de Carga Hidraulica				
Network Table - Nodes at 0:00 Hrs				
	Elevation	Demand	Head	Pressure
Node ID	m	LPS	m	m
Resvr Aliment	2.488	0.7147	2.99	0.502
Junc J-2	2.488	0.7147	2.52	0.032
Junc J-3	2.47	0.7147	2.49	0.02
Junc J-4	2.354	0.7147	2.4	0.046
Junc J-5	2.343	0.7147	2.35	0.007
Junc J-6	0.264	0.7147	1.72	1.456
Junc J-7	0.263	0.7147	1.69	1.427
Junc J-8	0.257	0.7147	1.64	1.383
Junc J-9	1.501	0.7147	1.6	0.099
Junc J-10	1.51	0.7147	1.58	0.07
Junc J-11	1.508	0.7147	1.53	0.022
Junc J-12	0.892	0.7147	1.47	0.578
Junc J-13	0.896	0.7147	1.45	0.554
Junc J-14	0.897	0.7147	1.4	0.503
Junc J-15	1.265	0.7147	1.37	0.105
Junc J-16	1.269	0.7147	1.35	0.081
Junc J-17	1.274	0.7147	1.31	0.036
Junc J-18	1.245	0.7147	1.26	0.015
Resvr Salida	0.002	0.7147	0.01	0.008



Como se mencionó en párrafos anteriores se realizó el cálculo matemático en el programa SWMM, de los cuales los resultados se presentaron en las tablas ya mostradas. El programa generó archivos de datos, compatibles con Excel, para el tratamiento de los resultados y la elaboración de esquemas y gráficas para la mejor comprensión de los resultados.

En resumen de los resultados de la simulación del comportamiento piezométrico y del flujo de las mediciones concernientes a los datos del experimento, se presentan en una tabla resumen que se muestra a continuación, así como en la siguiente figura se muestra el perfil del experimento y las líneas piezométricas, las cuales en ninguna de las simulaciones se encuentran por debajo del perfil del terreno natural, lo cual esto nos indica que el motor matemático de onda dinámica resuelve de mejor manera los cálculos matemáticos, por tal motivo los cálculos de simulación en SWMM son más exactos que los simulados en EPANET.

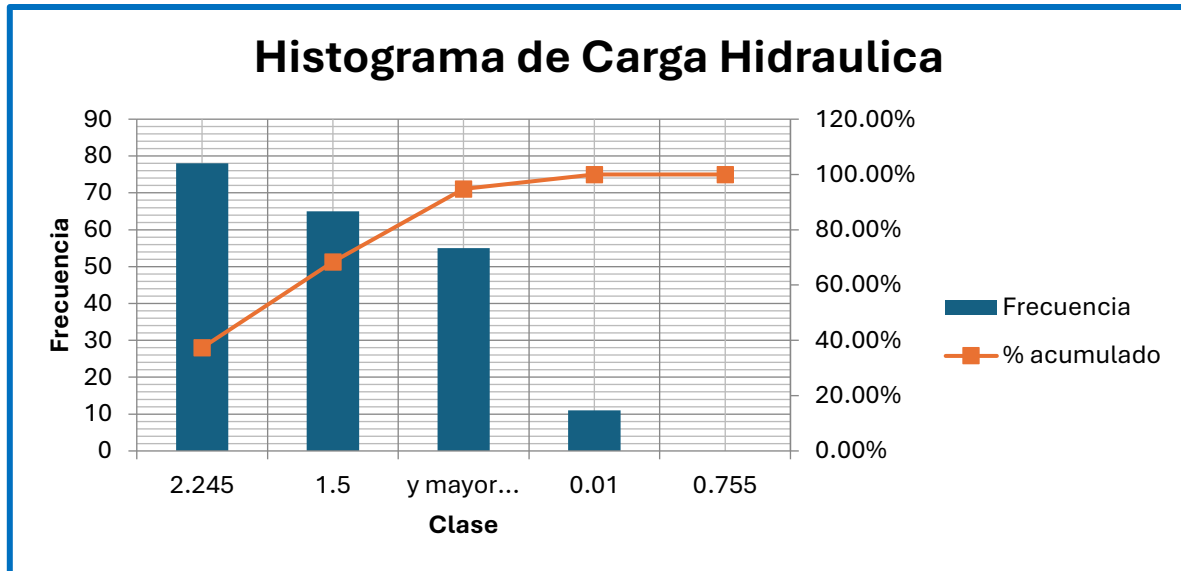
Tabla 61. Resumen de Cargas Hidráulicas en Nodos SWMM.

	Carga cm	30	81	101	132	163	183	203	224	234	244	285
	Q lps	0.2481	0.4494	0.4454	0.5126	0.5532	0.6092	0.6241	0.6407	0.671	0.6797	0.7147
Elevation	Posicion	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head	Head
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
2.4881	0	2.57	2.7	2.68	2.75	2.81	2.93	2.97	2.99	2.99	2.99	2.99
2.488	0.2671	2.5	2.51	2.54	2.55	2.56	2.55	2.54	2.53	2.53	2.52	2.52
2.47	0.4238	2.48	2.49	2.49	2.49	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.49	2.49
2.354	2.1658	2.37	2.37	2.38	2.39	2.42	2.43	2.43	2.43	2.43	2.4	2.4
2.343	2.2617	2.35	2.35	2.35	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.36	2.35	2.35
0.264	4.6041	1.57	1.62	1.72	1.85	1.99	2.01	1.99	1.91	1.91	1.72	1.72
0.263	4.9969	1.56	1.6	1.67	1.79	1.93	1.95	1.95	1.88	1.88	1.69	1.69
0.257	5.3358	1.56	1.6	1.65	1.76	1.87	1.88	1.87	1.8	1.8	1.64	1.64
1.501	6.9711	1.54	1.56	1.6	1.69	1.79	1.81	1.8	1.73	1.73	1.6	1.6
1.51	7.3041	1.53	1.53	1.56	1.63	1.73	1.75	1.75	1.7	1.7	1.58	1.58
1.508	7.5449	1.52	1.52	1.54	1.6	1.67	1.68	1.68	1.62	1.62	1.53	1.53
0.892	8.3774	1.32	1.37	1.48	1.54	1.61	1.62	1.63	1.58	1.58	1.47	1.47
0.896	8.5421	1.31	1.35	1.43	1.48	1.55	1.57	1.58	1.55	1.55	1.45	1.45
0.897	8.7154	1.31	1.35	1.41	1.45	1.49	1.5	1.51	1.47	1.47	1.4	1.4
1.265	9.2429	1.3	1.33	1.37	1.39	1.43	1.44	1.46	1.43	1.43	1.37	1.37
1.269	9.369	1.29	1.31	1.32	1.33	1.37	1.4	1.42	1.4	1.4	1.35	1.35
1.274	9.4496	1.29	1.3	1.3	1.3	1.31	1.33	1.35	1.33	1.33	1.31	1.31
1.245	10.0772	1.25	1.25	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
0.002	13.7119	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01



Tabla 62. Histogramas de Remen de Cargas Hidráulicas en Nodos SWMM.

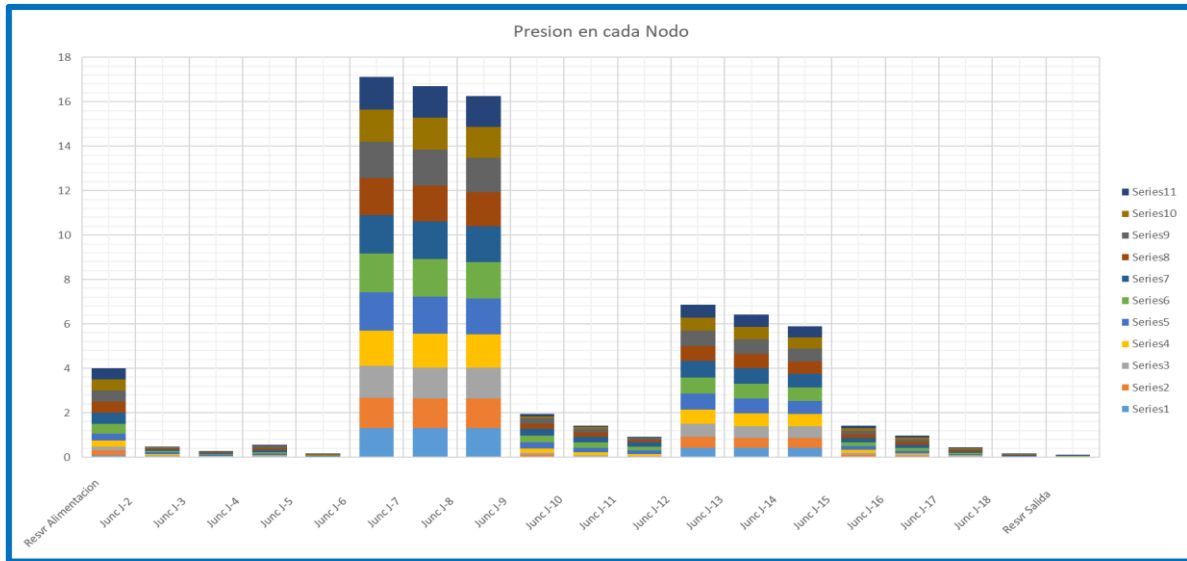
Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado
0.01	11	5.26%	2.245	78	37.32%
0.755	0	5.26%	1.5	65	68.42%
1.5	65	36.36%	y mayor...	55	94.74%
2.245	78	73.68%	0.01	11	100.00%
y mayor...	55	100.00%	0.755	0	100.00%



Gráfica 17. Histograma Carga Hidráulica Simulados en SWMM.

Tabla 63. Resumen de Presión en Nodos en Simulación en SWMM.

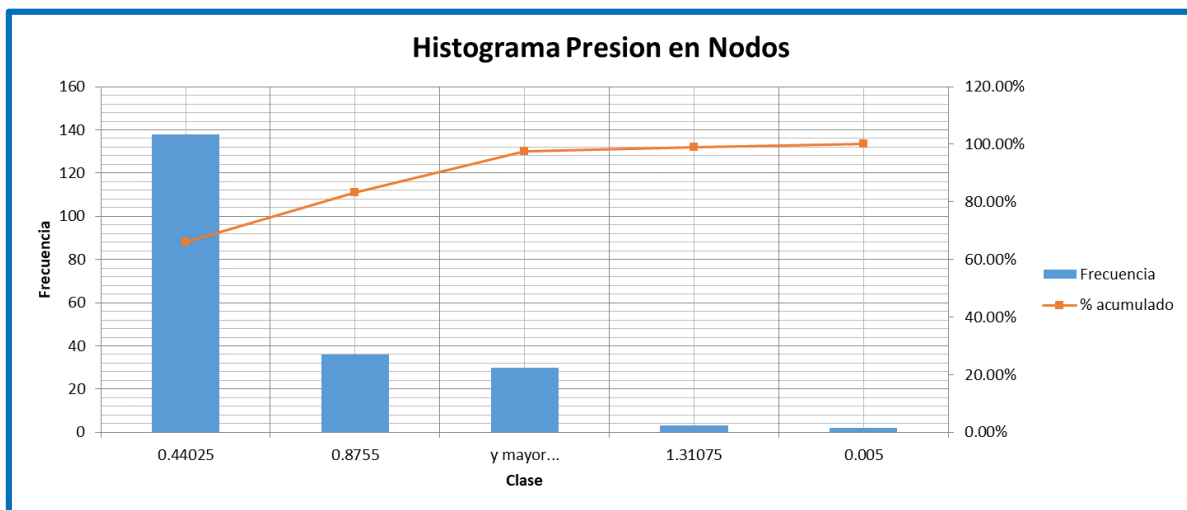
Carga cm	30	81	101	132	163	183	203	224	234	244	285
Q lps	0.2481	0.4494	0.4454	0.5126	0.5532	0.6092	0.6241	0.6407	0.671	0.6797	0.7147
Posicion	Presion	Presion	Presion	Presion	Presion	Presion	Presion	Presion	Presion	Presion	Presion
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
Resvr Aliment	0.082	0.212	0.192	0.262	0.322	0.442	0.482	0.502	0.502	0.502	0.502
Junc J-2	0.012	0.022	0.052	0.062	0.072	0.062	0.052	0.042	0.042	0.032	0.032
Junc J-3	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
Junc J-4	0.016	0.016	0.026	0.036	0.066	0.076	0.076	0.076	0.076	0.046	0.046
Junc J-5	0.007	0.007	0.007	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.007	0.007
Junc J-6	1.306	1.356	1.456	1.586	1.726	1.746	1.726	1.646	1.646	1.456	1.456
Junc J-7	1.297	1.337	1.407	1.527	1.667	1.687	1.687	1.617	1.617	1.427	1.427
Junc J-8	1.303	1.343	1.393	1.503	1.613	1.623	1.613	1.543	1.543	1.383	1.383
Junc J-9	0.039	0.059	0.099	0.189	0.289	0.309	0.299	0.229	0.229	0.099	0.099
Junc J-10	0.02	0.02	0.05	0.12	0.22	0.24	0.24	0.19	0.19	0.07	0.07
Junc J-11	0.012	0.012	0.032	0.092	0.162	0.172	0.172	0.112	0.112	0.022	0.022
Junc J-12	0.428	0.478	0.588	0.648	0.718	0.728	0.738	0.688	0.688	0.578	0.578
Junc J-13	0.414	0.454	0.534	0.584	0.654	0.674	0.684	0.654	0.654	0.554	0.554
Junc J-14	0.413	0.453	0.513	0.553	0.593	0.603	0.613	0.573	0.573	0.503	0.503
Junc J-15	0.035	0.065	0.105	0.125	0.165	0.175	0.195	0.165	0.165	0.105	0.105
Junc J-16	0.021	0.041	0.051	0.061	0.101	0.131	0.151	0.131	0.131	0.081	0.081
Junc J-17	0.016	0.026	0.026	0.026	0.036	0.056	0.076	0.056	0.056	0.036	0.036
Junc J-18	0.005	0.005	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
Resvr Salida	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008



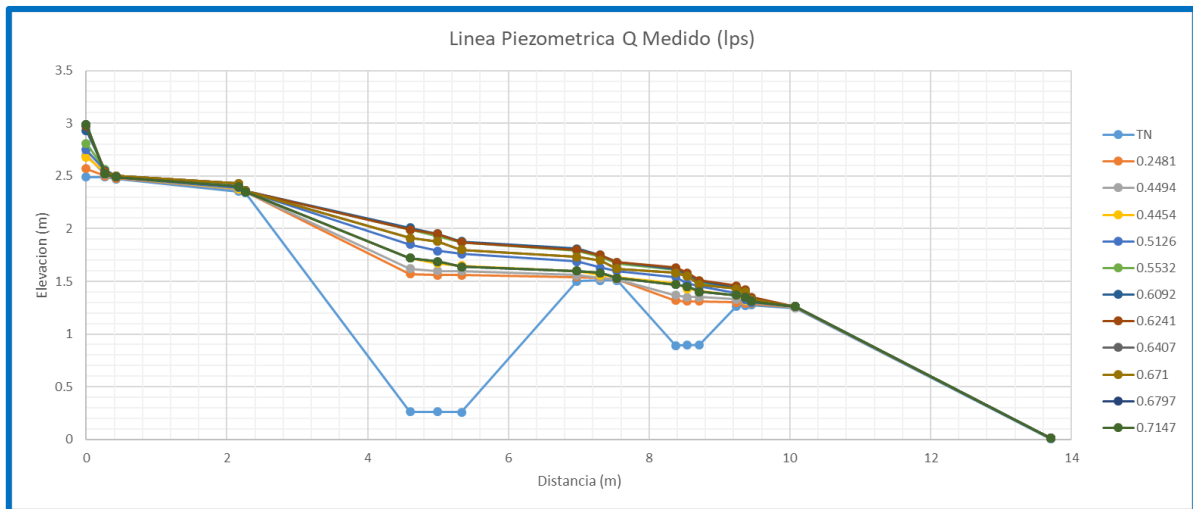
Gráfica 18. Presión vs Nodos en simulación SWMM.

Tabla 64. Histograma de Resumen de Presión en Simulación en SWMM.

Clase	Frecuencia	% acumulado	Clase	Frecuencia	% acumulado
0.005	2	0.96%	0.44025	138	66.03%
0.44025	138	66.99%	0.8755	36	83.25%
0.8755	36	84.21%	y mayor...	30	97.61%
1.31075	3	85.65%	1.31075	3	99.04%
y mayor...	30	100.00%	0.005	2	100.00%



Gráfica 19. Histograma Presión vs Nodos Simulado en SWMM.



Gráfica 20 Líneas Piezométricas Simuladas con Gasto Medido en Simulación SWMM.

La validez del modelo matemático para determina la presión o carga hidráulica causada por la modificación de la apertura de la válvula inicial, se observan en la gráfica 20. En ella se grafican los resultados de la presión simulada los cuales se asemejan a los datos piezométricos registrados durante las mediciones, encontrándose una muy buena aproximación entre ellos.

También se observó durante el proceso de experimentación que en las presiones iniciales bajas se presentaba un pulso en los cuales se expulsaba aire a treves de los piezómetros, las cuales empezaban a disminuir en cuanto se empezaba a incrementar la presión inicial y se estabilizaba el modelo experimental.



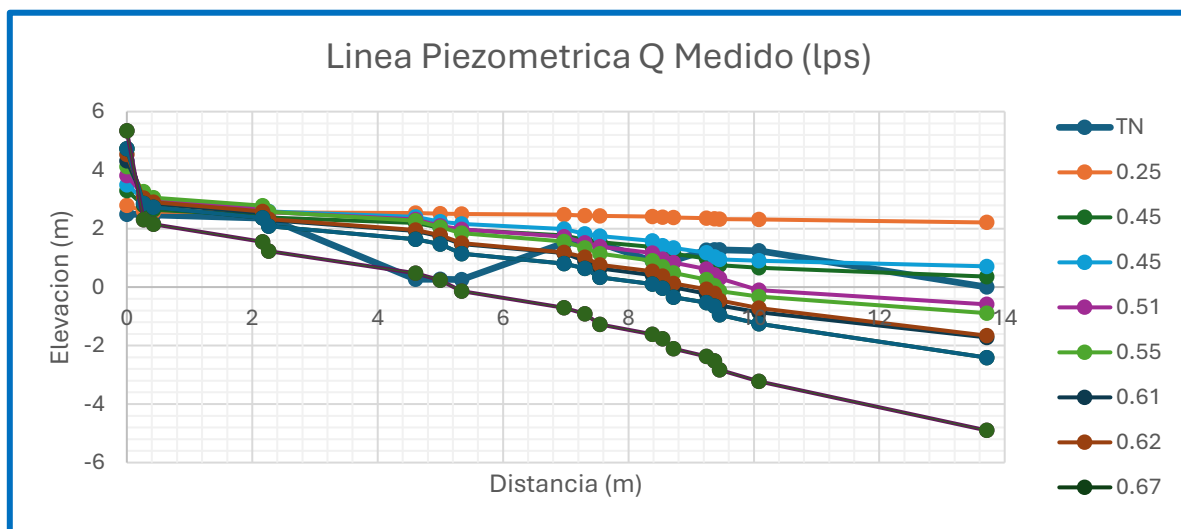
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES EN EPANET y SWMM

En este apartado se presentan los datos experimentales vs datos calculados en los modelos matemáticos descritos anteriormente.

6.1 EPANET

Se observa que existen diferencias entre los valores tanto de gasto como de velocidad, por lo que los resultados no son consistentes con relación a los observados en el modelo físico. También es claro que la línea piezométrica simulada en EPANET no concuerda con la realidad del modelo experimental.

Los resultados fueron analizados y presentados en las gráficas y tablas anteriores, donde se muestran en forma un tanto cualitativa el cálculo hidráulico en base a los parámetros obtenidos.



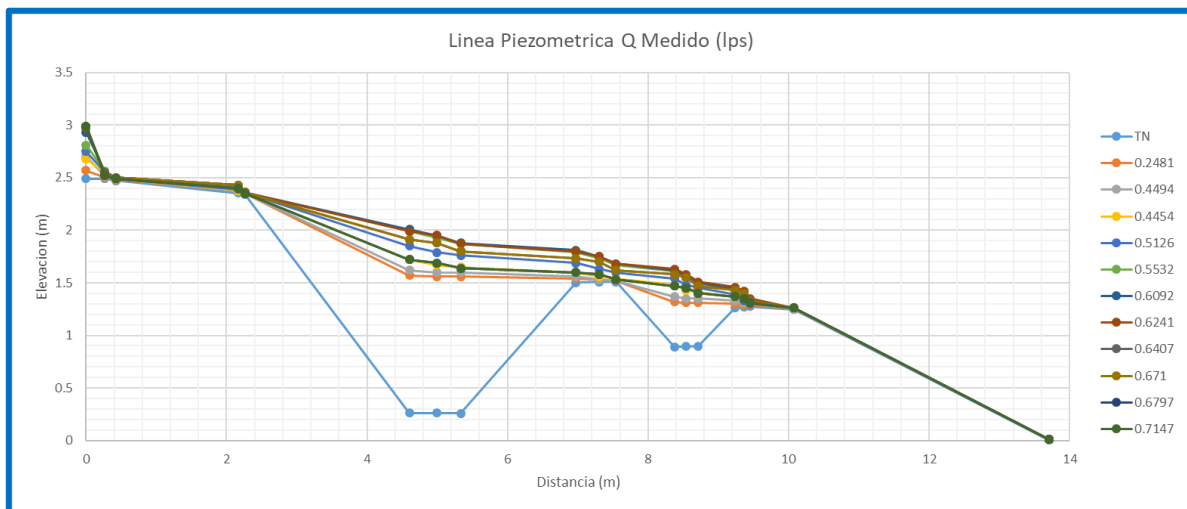
Gráfica 21. Perfiles Piezométricos Simulados en EPANET.



6.2 SWMM

La validez del modelo matemático para determina la presión o carga hidráulica causada por la modificación de la apertura de la válvula inicial, se observan en la gráfica 22. En ella se grafican los resultados de la presión simulada los cuales se asemejan a los datos piezométricos registrados durante las mediciones, encontrándose una muy buena aproximación entre ellos.

También se observó durante el proceso de experimentación que en las presiones iniciales bajas se presentaba un pulso en los cuales se expulsaba aire a treves de los piezómetros, las cuales empezaban a disminuir en cuanto se empezaba a incrementar la presión inicial y se estabilizaba el modelo experimental.



Gráfica 22. Perfiles Simulados en SWMM.

Desafortunadamente, no fue posible comparar el comportamiento de gastos durante todo el tiempo ya que no se contó con instrumentación como *data logger* para esta medida de diámetro, ni con el apoyo por parte de la institución para adquirirlos y poder tener mejor cantidad de datos. Sin embargo, se pudo realizar una verificación de la validez de los modelos matemáticos al comparar los resultados de los gastos medidos cuando alcanzo una estabilidad en el tiempo.



Hay dos importantes observaciones que hay que mencionar:

- La primera es que los resultados experimentales y numéricos se asemejan mejor en el análisis a través de SWMM el cual las líneas piezométricas se apegan mejor a lo medido.
- La segunda es que existe una dependencia clara entre el número de Reynolds para el cálculo de las pérdidas locales, las cuales varían en función del flujo que se tiene.

A continuación, se presentan las conclusiones más sobresalientes de la aplicación numérica de los modelos matemáticos de simulación al compararlos con los resultados experimentales que se obtuvieron:

obtuvieron:

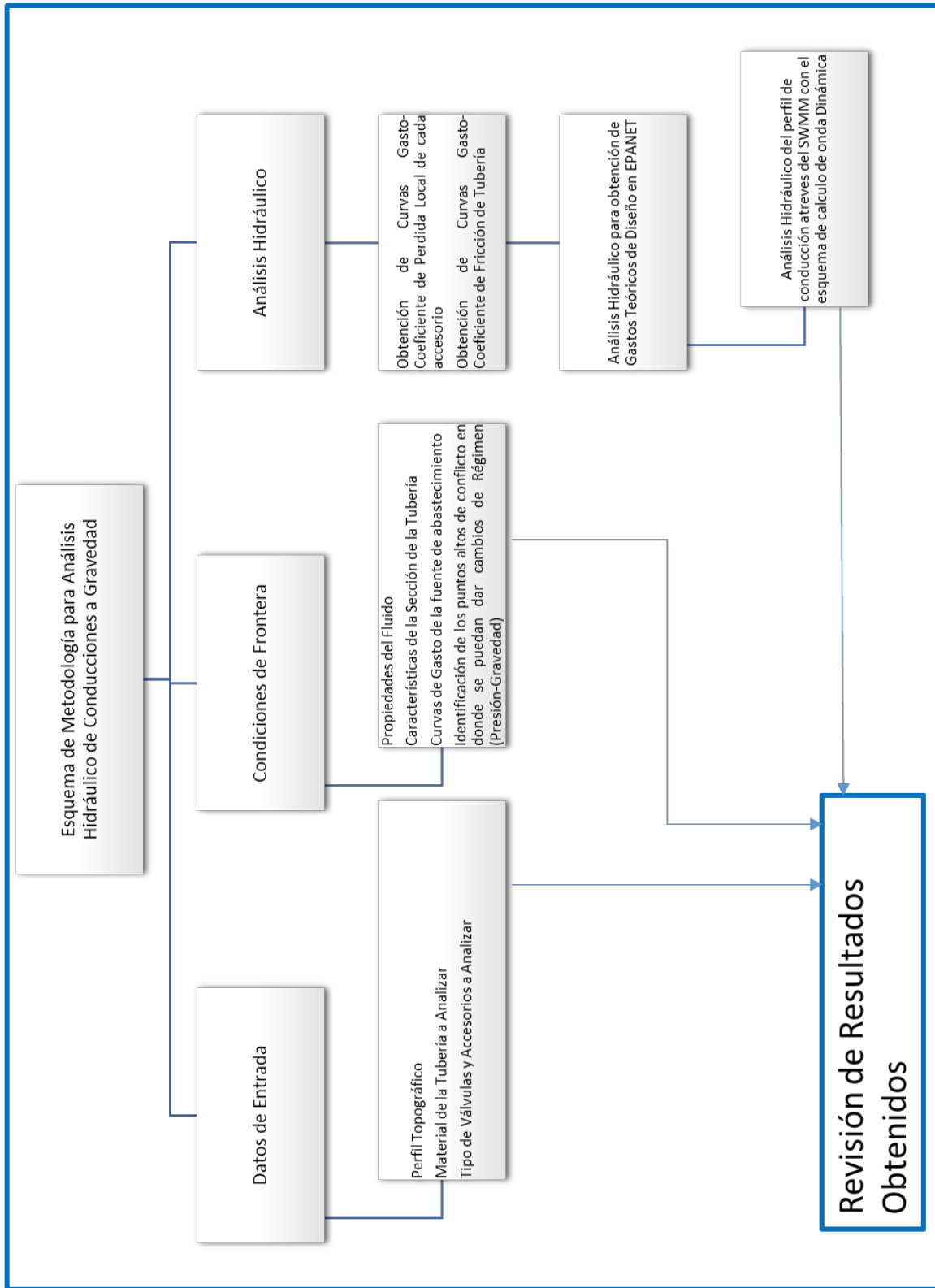


Figura 29. Flujo de Trabajo de Metodología de Análisis de Conducciones a Gravedad.



6.3 Propuesta metodológica para el análisis de conducciones a gravedad en relieve accidentado

Con base en los resultados obtenidos en el modelo experimental y en las simulaciones hidráulicas realizadas en EPANET y SWMM, se propone un flujo de trabajo metodológico para el análisis hidráulico de conducciones a gravedad en relieve accidentado. Esta metodología tiene como finalidad orientar la evaluación de sistemas en los que el supuesto de tubería completamente llena puede no representar adecuadamente el comportamiento real del flujo, especialmente cuando existen cambios importantes de pendiente, puntos altos, zonas de posible acumulación de aire, pérdidas locales significativas y transiciones entre flujo a presión y flujo parcialmente lleno.

La metodología parte de la caracterización geométrica e hidráulica de la conducción, considerando el perfil longitudinal, elevaciones, longitudes de tramo, diámetros, materiales, accesorios, válvulas y condiciones de carga disponible. Posteriormente, se identifican los puntos críticos del sistema, principalmente aquellos asociados con cambios bruscos de pendiente, crestas topográficas, descensos pronunciados, accesorios hidráulicos y zonas donde puede presentarse aire atrapado o reducción de la sección efectiva de flujo.

Una vez definida la geometría del sistema, se estiman las pérdidas por fricción y pérdidas locales. En esta investigación, dichos coeficientes fueron determinados experimentalmente para la tubería y accesorios del modelo físico, lo que permitió incorporarlos como parámetros de calibración en las simulaciones hidráulicas. Este paso es relevante debido a que los resultados experimentales muestran que los coeficientes de pérdida pueden variar en función del gasto de operación y de la velocidad del flujo.

Posteriormente, se realiza una primera evaluación hidráulica bajo la hipótesis de flujo a presión, utilizando herramientas como EPANET. Esta simulación permite estimar gastos, velocidades, presiones y líneas piezométricas bajo condiciones idealizadas de tubería llena. Sin embargo, debido a que EPANET no representa de manera directa el flujo a superficie libre ni el flujo mixto agua-aire, sus resultados deben interpretarse como una aproximación hidráulica de referencia.



De manera complementaria, se propone realizar una simulación en SWMM, principalmente mediante el esquema de onda dinámica, ya que este permite representar de forma más adecuada condiciones de tránsito hidráulico, almacenamiento en conductos, flujo parcialmente lleno y posibles transiciones hacia flujo presurizado. En el caso analizado, las líneas piezométricas obtenidas mediante SWMM presentaron una mejor aproximación al comportamiento observado en el modelo experimental, por lo que esta herramienta resulta útil para complementar el análisis de conducciones a gravedad con geometría irregular.

Finalmente, los resultados numéricos deben compararse con mediciones experimentales o datos de campo disponibles, tales como caudales, presiones, niveles piezométricos y observaciones visuales del comportamiento del flujo. Esta comparación permite validar o ajustar los parámetros hidráulicos empleados, identificar tramos donde la capacidad de conducción se ve reducida y definir recomendaciones de diseño u operación, tales como la ubicación de válvulas de aire, desfogues, estructuras de ruptura de carga o modificaciones en el perfil hidráulico.

La Figura 29 sintetiza el flujo de trabajo propuesto para el análisis de conducciones a gravedad en relieve accidentado, integrando la caracterización geométrica, la determinación de pérdidas hidráulicas, la simulación numérica, la comparación experimental y la formulación de criterios de diseño y operación.



7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hay pocos trabajos científicos y prácticos en resolver el problema de cálculo hidráulico en línea de conducción a gravedad, en general son empíricos y solo resuelven problemas particulares que se presentan. Una excepción es el estudio teórico-práctico publicado por AGUA PARA LA VIDA del Doctor Gilles Corcos (2005), que está enfocada en la remoción de aire y cálculo de gasto en línea de conducción a gravedad sin embargo no presenta el sustento matemático de las ecuaciones presentadas.

En la presente tesis se desarrolló la metodología de la simulación matemática del mejor comportamiento hidráulico de líneas de conducción a gravedad. El modelo fue comparado con un sistema hidráulico simple, consistente en una tubería conectada a la línea central del laboratorio de hidráulica, la cual aportó la presión de entrada y controla de misma mediante válvulas. El modelo fue probado de forma numérica y experimental para obtener los siguientes datos:

- Pérdidas por fricción en la tubería
- Pérdidas Locales en los accesorios instalados en el modelo
- Obtención de la velocidad teórica y práctica del sistema
- Gasto teórico y Práctico del sistema
- Así como las líneas piezométricas del sistema

Adicionalmente, con las observaciones de las pruebas experimentales realizadas obtuvieron las siguientes conclusiones con relación al comportamiento en conductos hidráulicos a gravedad:

- Para un gasto o caudal constante, el aire atrapado dentro de la tubería o del conducto hidráulico disminuye en función de la pendiente de la tubería.
- Para pendientes de la tubería mayores o sinuosas, la velocidad con la que el flujo para remover el aire por empuje hidrodinámico disminuye conforme a la pendiente aguas debajo de la conducción.



- Existe pérdida de carga hidráulica por el aire atrapado en la conducción la cual puede ser otro tema de análisis, el cual no se contempla en esta metodología.
- El coeficiente de pérdida de local debe ser calculado en función del gasto de operación ya que este valor depende de la velocidad del fluido que circula a través del accesorio.
- El coeficiente de pérdida por fricción debe calcularse en función del gasto de operación y calibrado en el modelo matemático.
- Los datos experimentales muestran que para diámetros pequeños el comportamiento depende del aire atrapado en la línea de conducción.
- Conforme al tirante de aguas abajo en pendientes pronunciadas el aire atrapado hace pequeño este valor ya que el volumen de aire es mayor.
- Se observó en el análisis hidráulico que cuando la carga inicial en el sistema es pequeña hay cambios de régimen en función de la topografía o pendientes de los tramos simulados.
- En SWMM se representan mejor las líneas piezométricas en función del gasto tanto teórico como práctico.

El modelo desarrollado aquí puede resultar útil en la solución de varios problemas que se presentan en el diseño y operación de obras hidráulicas, principalmente en conducciones de diámetros pequeños o menores a 2 pulgadas, como son los diámetros utilizados en la práctica en sistemas de conducción para suministrar agua a comunidades rurales.

Además, el llenado de conductos hidráulicos es una actividad del operador, muchos de los problemas ocasionados durante estos trabajos pueden ser evitados, si se previenen desde la etapa de diseño y construcción.

Por lo tanto, durante el diseño de este tipo de conducciones a gravedad, el comportamiento de llenado y en especial del aire atrapado, puede simularse con la metodología desarrollada, acoplado a la simulación de onda dinámica.

De esta manera se pueden predecir los puntos propensos a tener problema de aire y cambio de régimen debido a los paramentos hidráulicos que envuelven al sistema, como es proponer cambios de trazo, curvas de gastos de llenado, etc. Finalmente, es importante mencionar que con los resultados obtenidos en esta tesis se ha logrado conocer mejor el comportamiento de



las conducciones a gravedad de diámetros pequeños y se deja un camino nuevo para la investigación de la simulación matemática de este fenómeno de hidráulico.

El análisis hidráulico de conducciones por gravedad en zonas con relieve accidentado es un reto que no ha sido atendido con la profundidad y detalle que se necesita. En ocasiones el diseño se efectúa sin considerar que, debido a lo accidentado de la topografía, en segmentos de la conducción con pendientes positivas pronunciadas (descendente en la dirección del flujo), la tubería puede funcionar parcialmente llena, con el flujo sujeto a la presión atmosférica. Esta situación puede llevar a un diseño insuficiente del diámetro de la tubería, dado que en los tramos que funcionan a superficie libre, se rompe la presión - lo que es equivalente a una pérdida de energía -, disminuyendo la carga hidráulica disponible. Esto se traduce en una capacidad de conducción de la tubería inferior a la teóricamente esperada.



8 Bibliografía

- Abreu, J., Cabrera, E., Garcia-Serra, J., & Iglesias, P. (1991). *Boundary between Elastic and Inelastic Models in Hydraulic Transients with Entrapped Air Pockets*. Valencia España: International Conference on Hydraulic Transiente With Water.
- Abreu, J., Cabrera, E., Izquierdo, J., & Garcia-Serra, J. (1999). *Flow modeling in pressurized systems revisited*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Aragón-Hernández, J.-L., Concha, R., Bladé, E., & Gómez, M. (2009). Comparación de dos esquemas numéricos en la modelación de flujo mixto en colectores pluviales. *Jornadas de Ingeniería del Agua*.
- Aragón-Hernández, J., Bladé, E., & Gómez, M. (2011). Modelación numérica de flujo mixto y bolsas de aire atrapado en colectores pluviales. *Jornadas de Ingeniería del Agua*.
- AWWA. (2001). *Air-release, air-vacuum, and combination air valves*. Denver 1: Manual of water supply practices M51; American Water Works Association.
- Barnett, A. (2010). Application of Godunov-type schemes to transient mixed flows. *Journal of Hydraulic Research*.
- Benjamin, T. (1968). *Gravity Currents and Related Phenomena*. Fluid Mechanics Vol 31.
- Bergant, A., Simpson, A., & Tijsseling, A. (2006). *Water hammer with column separation: A historical review*. Journal of Fluids and Structures.
- Bliss, K. y. (1943). *Removal of Air From Pipelines by Flowing Water*. ASCE Civil Engineering.
- Bourdarias, C., & Gerbi, S. (2007). *A finite volume scheme for a model coupling free surface and pressurised flows in pipes*. Journal of Computational and Applied Mathematics.
- Bousso, S., Daynou, M., & Fuamba, M. (2013). *Numerical modeling of mixed flows in storm water systems: Critical review of literature*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Brown, R. (1968). Water column separation at two pumping plants. *Journal of Basic Engineering*.
- Burrows, R. (2003). A cautionary note on the operation of pumping mains without appropriate surge control and the potentially detrimental impact of small air pockets. *Paper submission for IAHR / IWA International Conference*.
- Burrows, R., & Qiu, D. (1995). Effect of air pockets on pipeline surge pressure. *Journal of Water*.
- Cabrera, E., Abreu, J., Perez, R., & Vela, A. (1992). *Influence of liquid length variation in hydraulic transients*. Journal of Hydraulic Research.
- Capart, H., Sillen, X., & Zech, Y. (1997). Numerical and experimental water transients in sewer pipes. *Journal of Hydraulic Research*.
- Cardle, J., & Song, C. (1988). Mathematical modelling of unsteady flow in storm sewers. *International Journal of Engineering Fluid Mechanics*.
- Carmona, R., Sanchez, A., & Valencia, J. (1989). *Modelación Física y Matemática para el llenado de tuberías y flujo en tuberías parcialmente llenas para acueductos*. Mexico: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Chaudhry, M. (2014). *Applied hydraulic transients*. Springer, Columbia.
- Chaudhry, M. H. (1993). *Open channel flow*. New Jersey, USA: Prentice Hall.



- Chavez, E., & Arreguin. (1984). Aireacion en flujos de alta velocidad. *X Congreso de la Academia Nacional de Ingenieria*, Mexico.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2014). Fluid Mechanics. Fundamental and Applications. *Mc Graw Hill*, 3 Edition
- CONAGUA. (2016). Conducciones, Libro 10. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*.
- Coronado-Hernandez, O., Fuenres-Miquel, V., & Angulo-Hernandez, F. (2018). *Emptying operation of water supply networks*. Water, 10.
- Coronado-Hernandez, O., Fuentes-Miquel, V., Besharat, M., & Ramos, H. (2017b). *Experimental and numerical analysis of a water emptying pipeline using different air valves*. Water, 9(2)(98):1–15.
- Coronado-Hernandez, O., Fuertes-Miquel, V., Besharat, M., & Ramos, H. (2017 b). *Experimental and numerical analysis of a water emptying pipeline using different air valves*. Water.
- Coronado-Hernandez, O., Fuertes-Miquel, V., Besharat, M., & Ramos, H. (2017b). *Experimental and numerical analysis of a water emptying pipeline using different air valves*. Water.
- Covas, D., Stoianov, I., Ramos, H., Graham, N., Maksimovic, C., & Butler, D. (2010). *Water hammer in pressurized polyethylene pipes: conceptual model and experimental analysis*. Urban Water Journal.
- Cunge, J., & Wegner, M. (1964). Intégration numérique des équations d'écoulement de Barré de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies. *La Houille Blanche*.
- Djordjevic, S., Prodanovic, D., Maksimovic, C., Ivetic, M., & Savic, D. (2005). SIPSON-simulation of interaction between pipe flow and surface overland flow in networks. *Water Science and Technology*.
- Falvey, H. (1980). *Air-water flow in hydraulic systems*. Bureau of Reclamation Engineering monograph.
- Falvey, H. (1980). *Water Flow in Hydraulics Structures*. WPRS: Water Resources Technical Publication.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin, Germany: pringer-Verlag.
- Fontana, N., Galdiero, E., & Giugni, M. (2016). *Pressure surges caused by air release in water pipelines*. Journal of Hydraulic Research.
- Förster, G. (1997). Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen. *Mitteilungen des Institutes für Wasserbau der Universität Stuttgart*.
- Fuamba, M. (2002). Contribution on transient flow modelling in storm sewers. *Journal of Hydraulic Research*.
- Fuentes, R. C. (1970). *Estudio del movimiento de una burbuja de aire en un tubo horizontal*. Oaxtepec Mexcio: Memorias del congreso latinoamericano de Hidraulica IAHR.
- Fuentes, V. (2001). *Hydraulic transients with entrapped air pockets*. Polytechnic University of Valencia, Spain: PhD thesis, Department of Hydraulic Engineering.
- Fuentes, V. (2001). *Hydraulic transients with entrapped air pockets; PhD thesis*. Polytechnic University of Valencia, Spain.: Department of Hydraulic Engineering.



- Fuertes-Miquel, V., Coronado-Hernandez, O., Iglesias-Rey, P., & Mora-Melia, D. (2018b). *Transient phenomena during the emptying process of a single pipe with water-air interaction*. Journal of Hydraulic Research.
- Fuertes-Miquel, V., Coronado-Hernandez, O., Mora-Melian, D., & Iglesias-Rey, P. (2018). *Hydraulic modeling during filling and emptying processes in pressurized pipelines: A literature review*. USA: Urban Water Journal, Submitted.
- Fuertes-Miquel, V., Lopez-Jimenez, P., Martinez-Solano, F., & Lopez-Patiño, G. (2016). *Numerical modelling of pipelines with air pockets and air valves*. Journal of Civil Engineering.
- Fuertes-Miquel, V., Lopez-Jimenez, P., Martinez-Solano, F., & Lopez-Patiño, G. (2016). *Numerical modelling of pipelines with air pockets and air valves*. Canadian: Canadian Journal of Civil Engineering.
- García-Navarro, P., Priestley, A., & Alcrudo, F. (1994). An implicit method for water flow modelling in channels and pipes. *Journal of Hydraulic Research*.
- Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., & Axworthy, D. H. (2005). *A review of water hammer theory and practice*. Applied Mechanics Reviews.
- Gilles, Corcos. (2005) A Manual for Designers of Spring-Supplied Gravity-Driven. Drinking Water Rural Delivery Systems.
- Gomez, M. (2008). *Transformación lluvia-caudal mediante uso de la onda cinemática*. Barcelona, España: Alfambra.
- Gómez, M., & Achiaga, V. (2001). Mixed flow modelling produced by pressure fronts from upstream and downstream extremes. *6th International Conference on Urban Drainage Modeling*.
- Gonzalez, C., & Pozos, O. (2000). Análisis experimental del ingreso de aire en un acueducto. *Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Guarga, R., Acosta, A., & Lorenzo, E. (1996). *Dynamic Compression of Entrapped Air Pockets by Elastic Water Columns*. Uruguay Mnotevideo: Reporte del Instituto de Mecanica de Fluidos e Ingenieria Ambiental .
- Guinot, V. (2001). *The discontinuous profile method for simulating two-phase flow in pipes using the single component approximation*. International Journal for Numerical Methods in Fluids.
- Hamam, M., & McCorquodale, J. (1982). Transients conditions in the transition from gravity to surcharged sewer flow. *Canadian Journal of Civil Engineering*.
- Hashimoto, K., Imaeda, M., & Osayama, A. (1988). Transients of fluid lines containing and air pocket or liquid column. *Journal of Fluid Control*.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical computation of internal and external flows: the fundamentals of computational fluid dynamics*. Great Britain: Butterworth-Heinemann.
- Holley, E. (1969). Surging in laboratory pipeline with steady inflow. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Horlacher, H., & Lüdecke, H. (1992). Strömungsberechnung für Rohrsysteme.
- Hou, Q., Tijsseling, A., Laanearu, J., Annus, I., Koppel, T., Bergant, A., . . . Westende, J. (2014). *Experimental investigation on rapid filling of a large-scale pipeline*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Izquierdo, J., Fuentes, V., Cabrera, E., Iglesias, P., & Garcia-Serra, J. (1999). *Pipeline start-up with entrapped air*. Journal of Hydraulic Research, 37(5):579–590.
- Izquierdo, J., Fuertes, V., Cabrera, E., Iglesias, P., & Garcia-Sierra, J. (1999). *Pipeline start-up with entrapped air*. Journal of Hydraulic Research.



- Jönsson, L. (1985). Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment. *Proceeding of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations*.
- Jönsson, L. (1992). Anomalous pressure transients in sewage lines. *Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Transients*.
- Kalinske, A., & Robertson, J. (1943). *Closed Conduit Flow*. USA: Trans American Society of Civil Engineering.
- Kennison, K. (1943). *Closed Conduit Flow*. USA: Trans American Society of Civil Engineering.
- Kent, J. (19520). *The Entrainment of air by water flowing in circular conducts with downgrade slopes*. California: Doctoral Thesis, Univ. of California Berkeley.
- Kerger, F., Archambeau, P., Erpicum, S., Dewals, B., & Pirotton, M. (2011). A fast universal solver for 1D continuous and discontinuous steady flows in rivers and pipes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.
- Kottmann, A. (1992). Druckstoßermittlung in der Wasserversorgung.
- Laanearu, J., Annus, I., Koppel, T., Bergant, A., Vuckovic, S., Hou, Q., . . . Westernde, J. (2012). *Emptying of large-scale pipeline by pressurized air*. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Laanearu, J., Annus, I., Koppel, T., Bergant, T., Vučković, S., Hou, S., . . . Van'tWestende, J. (2012). Emptying of large-scale pipeline by pressurized air. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Landon, P. (1997). *Air in pipelines: sources, system impact, removal by air valves*. Val-Matic Valve & Mfg.
- Larsen, T., & Burrows, R. (1992). Measurements and computations of transients in pumped sewer plastic mains. *Proceedings of the BHR Group / IAHR International Conference on Pipeline Systems*.
- Lee, N. (2005). *Effect of pressurization and expulsion of entrapped air in pipelines*. USA: Georgia Institute of Technology.
- Leon, A. S., Ghidaoui, M. S., Schmidt, A. R., & Garcia, M. (2010). *A robust two-equation model for transient-mixed flows*. *Journal of Hydraulic Research*.
- León, A., Ghidaoui, G., Schmidt, A., & García, M. (2009). Application of Godunov-type schemes to transient mixed flows. *Journal of Hydraulic Research*.
- León, A., Ghidaoui, M., Schmidt, A., & García, H. (2006). Godunov-type solutions for transient flows in sewers. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Li, J., & McCorquodale, J. (1999). Modeling mixed flow in storm sewers. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Liou, C., & Hunt, W. (1996). *Filling of pipelines with undulating elevation profiles*. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Liou, P., & Hunt, A. (1996). *Filling of Pipelines with Undulating Elevation Profiles*. USA: *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE.
- Liu, D., Zhou, L., Karney, B., Zhang, Q., & Ou, C. (2011). Rigid-plug elastic water model for transient pipe flow with entrapped air pocket. *Journal of Hydraulic Research*.
- Liu, G., & Liu, M. (2003). *Smoothed particle hydrodynamics : a meshfree particle method*. New Jersey, USA: World Scientific, Cop.
- Malekpour, A., & Karney, B. (2014). Column separation and rejoinder during rapid pipeline filling induced by a partial flow blockage. *Journal of Hydraulic Research*.
- Martin, C. (1976). *Entrapped Air Pipelines*. England: Hydromech Research Association.



- Martin, C. (1976). *Vertically Ownward Two-Phase Slug Flow*. Journal Fluid Engineering ASME.
- Martin, S. (1996). Two-phase gas-liquid experiences in fluid transients. *International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels*.
- Martino, G., Fontana, N., & Giugni, M. (2001). *Transient flow caused by air expulsion through an orifice*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Martins, N., Delgado, J., Ramos, H., & Covas, D. (2017). *Maximum transient pressures in a rapidly filling pipeline with entrapped air using a cfd model*. Journal of Hydraulic Research.
- Martins, N., Soares, A., Ramos, H., & Covas, D. (2016). *Cfd modeling of transient flow in pressurized pipes*. Computers & Fluids.
- Martins, S., Ramos, H., & Almeida, A. (2015). Conceptual analogy for modelling entrapped air action in hydraulic systems. *Journal of Hydraulic Research*.
- Martins, S., Ramos, H., & Almeida, A. (2010). Mathematical modeling of prespressurized system behaviour with entrapped air. *In Environmental Hydraulics: Theoretical Experimental and Computational Solutions*.
- Mott, R. (1996). Mecánica de fluidos aplicada. *Prentice-Hall Hispanoamerica*.
- Ochoa, A. (2005). *Modelacion de Aire Atrapado en Flujo de Agua en Conductos*. Mexico: Universidad Autonoma de Mexico.
- Politano, M., Odgaard, A., & Klecan, W. (2007). Case study: numerical evaluation of hydraulic transients in a combined sewer overflow tunnel system. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Pozos, O., Gonz'alez, C., Giesecke, J., Marx, W., & Rodal, E. (2010). Air entrapped in gravity pipeline systems. *Journal of Hydraulic Research*.
- Preissmann, A. (1961). Propagation des intumescences dans les canaux et rivi'ere. *Proceedings 1st Congress Association Francaise de Calcul*.
- Qiu, D. (1995). Transient analysis and the effect of air pockets in a pipeline. *Master of Philosophy Thesis*.
- Ramezani, L., Karney, B., & Malekpour, A. (2016). *Encouraging effective air management in water pipelines: A critical review*. Journal of Water Resources Planning and Management.
- Ramezani, L., & Karney, B. (2017). *Water column separation and cavity collapse for pipelines protected with air vacuum valves*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Richards, R. (1957). *Air binding in large pipe lines flowing under vacuum*. Journal of the Hydraulics Division.
- Richards, R. (1962). *Air binding in water pipelines*. AWWA.
- Rodal, E., Carmona, R., Gonzalez, C., & Pozos, O. (2000). *Aumento de la perdida de carga en conducciones debido a aire atrapado*. Cordoba Argentina : XIX Congreso Latinoamericano de Hidraulica IAHR.
- Rodi, W. (2000). *Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review*. Rotterdam, The Netherlands: IAHR.
- Rossman, L., & Simon, M. (2022). Storm Water Management Model User's Manual Version 5.2 (EPA/600/R-22/30). *U.S. Environmental Protection Agency*.
- Rossman, L., Woo, H., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2020). EPANET 2.2 User manual (EPA/600/R-20/133). *U.S. Environmental Protection Agency*.



- Safwat, H., Arastu, A., & Husaini, S. (1986). *Generalized Applications of Method of Characteristics for the Analysis of Hydraulic Transiente Involving Empty Sections*. Hannover Germany: BHRA International Conference on Pressure Surges.
- Sailer, R. (1955). *San Diego aqueduct*. Journal of civil engineering.
- Sanchez, A., Rodal, E., & Hernandez, J. (1993). *Estudio experimental de la estabilidad de burbujas de aire atrapado en un codo vertical*. Mexico: Instituto de Ingenieria UNAM.
- Song, C., Cardle, J., & Leung, K. (1983). Transient mixed-flow models for storm sewers. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Stephenson, D. (1997). Effects of air valves and pipework on water hammer pressure. *Journal of Transportation Engineering*.
- Stephenson, D. (1997). *Effects of air valves and pipework on water hammer pressures*. Journal of Transportation Engineering.
- Swamee, P., & Jain, A. (1976). *Explicit equations for pipe-flow problems*. Journal of the Hydraulics Division.
- Tan, W. (1992). *Shallow water hydrodynamics: mathematical theory and numerical solution for a*. Amsterdam, The Netherlands,: Elsevier.
- Thomas, H. (1982). *Air demand Distorsion un Hydraulics Models*. England: BHRA, Int Conference on Hydraulic Modeling.
- Thorley, A. (2004). Fluid transients in pipeline systems.
- Tijsseling, A., Hou, Q., Bozkus, Z., & Laanearu, J. (2016). *Improved one-dimensional models for rapid emptying and filling of pipelines*. Journal of Pressure Vessel Technology.
- Toro, E. (2001). Shock-capturing methods for free surface shallow flows. *John Wiley and Sons*.
- Trajkovic, B., Ivetic, M., Calomino, F., & D'Ippolito, A. (1999). "Investigation of transition from free surface to pressurized flow in a circular pipe. *Water Science and Technology*,.
- Vasconcelos, J., & Marwell, D. (2011). *Innovative simulation of unsteady low-pressure flows in water mains*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Vasconcelos, J., & Wright, S. (2008). *Rapid flow startup in filled horizontal pipelines*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Vasconcelos, J., Wright, S., & Roe, P. (2006). "Improved simulation of flow regime transition in sewers: two-component pressure approach.". *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Vasconcelos, J., Wright, S., & Roe, P. (2006). Improved simulation of flow regime transition in sewers: two-component pressure approach. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the*. Harlow, England: Person Education Limited.
- Wallis, D. R. (1965). *Atomic Energy Commission Report*. Euraec: NYO 31148.
- Wang, K., Shen, Q., & Zhang, B. (2003). Modeling propagation of pressure surges with the formation of an air pocket in pipelines. *Computers & Fluids*.
- Wang, L., Wang, F., Karney, B., & Malekpour, A. (2017). *Numerical investigation of rapid filling in bypass pipelines*. Journal of Hydraulic Research, 0(0):1–10.



- Wang, H., Zhou, L., Liu, D., Karney, B., Wang, P., Xia, L., . . . Xu, C. (2016). Cfd approach for column separation in water pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Wiggert, D. (1972). Transient flow in free-surface, pressurized systems. *Journal of the Hydraulics Division*.
- Wright, S., Vasconcelos, J., Creech, C., & Lewis, J. (2008). Flow regime transition mechanisms in rapidly filling stormwater storage tunnels. *Environmental Fluid Mechanics*.
- Wylie, E. B., Streeter, V. L., & Suo, L. (1993). *Fluid transients in systems*. Upper Saddle River, New York: Prentice Hall.
- Wylie, E., & Streeter, V. (1993). *Fluid transients in systems*. New Jersey: Prentice Hall, Englewood.
- Wylie, E., Streeter, V., & Suo, L. (1993). *Fluid transients in systems*. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Yang, K. (2001). *Practical method to prevent liquid-column separation*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Yen, B. (1986). Hydraulics of sewers. *Advances in Hydrosience*.
- Zhou, F. (2000). Effects of trapped air on flow transients in rapidly filling sewers. *Doctor of Philosophy Thesis*.
- Zhou, F., Hicks, M., & Steffler, P. (2002). *Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Zhou, L., & Liu, D. (2013). *Experimental investigation of entrapped air pocket in a partially full water pipe*. Journal of Hydraulic Research, 51(4):469–474.
- Zhou, L., Liu, D., & Karney, B. (2013 b). *Phenomenon of white mist in pipelines rapidly filling with water with entrapped air pocket*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Zhou, L., Liu, D., & Karney, B. (2013). *Phenomenon of white mist in pipelines rapidly filling with water with entrapped air pocket*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Zhou, L., Liu, D., & Karney, B. (2013a). *Investigation of hydraulic transients of two entrapped*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Zhou, L., Liu, D., & Ou, C. (2011b). *Simulation of flow transients in a water filling pipe containing entrapped air pocket with vof model*. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics.
- Zhou, L., Liu, D., Karney, B., & Zhang, Q. (2011a). *Influence of entrapped air pockets on hydraulic transients in water pipelines*. Journal of Hydraulic Engineering.
- Zikanov, O. (2010). *Essential computational fluid dynamics*. New Jersey, USA: John Wiley and Sons, Inc.



9. Curriculum Vitae

RODRIGO RUIZ SANTOS

SOBRE MI

Gerente General /20 Años de Experiencia en SIRIAME INGENIERIA / Ingeniero Civil (2003) / Experto en Análisis de Datos, Gestión de Proyectos y Resolución de Problemas Complejos. Motivado a aportar mi liderazgo al éxito de su equipo

EXPERIENCIA LABORAL

SIRIAME INGENIERIA, Chihuahua Mar 2008-Actualidad

Gerente General

Elaboración de Proyectos Ejecutivos relacionados con la Hidrología e Hidráulica

FACULTAD DE INGENIERIA UACH

Chihuahua

Ago 2005-Actualidad

Profesor Tiempo Completo

Profesor de las Asignaturas de Hidráulica de Tuberías a Presión, Hidráulica de Canales, Hidrología Superficial, Topografía en Obras Hidráulicas, Geofísica

EDUCACION

FACULTAD DE INGENIERIA UACH

Chihuahua

2003

Ingeniero Civil

Estudios Realizados en Agosto 1999 a Diciembre 2003 Ced. Prof. Federal: 4733077 ; Prof Estatal: 10 194 127 S III

FACULTAD DE INGENIERIA UACH

Chihuahua

2005

Maestría en Ingeniería

Maestría en Hidrología Subterránea (Modelación Matemática) Estudios realizados de Enero 2004 a Diciembre 2005. Prof. Federal: 5797506; Prof Estatal: 10 139 143 S III



PUBLICACIONES

4 Publicaciones como Autor Principal de Artículos Científicos en Revistas Indexadas con Registro ISSN

4 Publicaciones como Co-Autor de Artículos Científicos en Revistas Indexadas con Registro ISSN

1 Co-Autor del Capitulo del LIBRO: **CUENCA DEL RÍO CONCHOS: UNA MIRADA DESDE LAS CIENCIAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO.**

EXPERIENCIA PROFESIONAL

DESPACHOS DE ARQUITECTURA

Chihuahua

Elaboración de Proyectos Hidrosanitario y Gas Combustible para Torres Habitacionales de mas de 100 m de Altura

Secretaria de Salud del Estado de Chihuahua

Elaboración de mas de 20 Proyectos Ejecutivos Hidrosanitarios y Gas Combustible en Hospitales en el estado de Chihuahua

Agnico Eagle México (Pinos Altos)

Elaboración de Modelos Matemáticos en:

- Hidrología Superficial
- Hidrología Subterránea
- Hidráulica
- Geofísica
- Simulación Estocástica GOLDSIM

Agnico Eagle México (La India)

Elaboración de Modelos Matemáticos en:

- Hidrología Superficial
- Hidrología Subterránea
- Hidráulica
- Geofísica

Vizlar Silver Corp (Morgan COPALA)

Elaboración de Modelos Matemáticos en:

- Hidrología Superficial
- Hidrología Subterránea
- Hidráulica
- Geofísica



Junta Central de Agua y Saneamiento de Chihuahua

Elaboración de mas de 50 Proyectos Ejecutivos

- Agua Potable
- Alcantarillado
- Plantas de Tratamiento