

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
ECUADOR**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL



**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE
INGENIERO CIVIL**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE
LABORATORIO PARA MODELAR EL FUNCIONAMIENTO DE
VÁLVULAS DE AIRE Y DE PURGA EN CONDUCTOS A PRESIÓN”**

**PAULA ANDREA JARAMILLO TELLO
JACK FELIPE VÁSQUEZ WITT**

QUITO, 2019

Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.2 Justificación.....	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Metodología.....	13
1.5 Alcance.....	14
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	15
2.1 Hidráulica de tuberías a presión	15
2.1.1 Propiedades físicas del fluido.....	15
2.1.1.1 Densidad relativa (γ).....	15
2.1.1.2 Densidad.....	15
2.1.1.3 Viscosidad	15
2.1.1.3.1 Viscosidad dinámica o absoluta (μ)	15
2.1.1.3.2 Viscosidad cinemática (ν).....	16
2.1.2 Tubería a presión	17
2.1.2.1 Presión.....	17
2.1.2.1.1 Presión atmosférica (<i>P_{atm}</i>)	18
2.1.2.1.2 Presión manométrica y Presión absoluta (<i>P_{man}</i> , <i>P_{abs}</i>).....	18
2.1.2.1.3 Vacío <i>P_{Vac}</i>	18
2.1.3 Flujo en tuberías a presión	18
2.1.3.1 Definición.....	18
2.1.3.2 Tipología	19
2.1.4 Características del Flujo incompresible	20
2.1.5 Funcionamiento hidráulico.....	21
2.1.5.1 Caracterización del flujo	21
2.1.5.2 Tasa de flujo por unidad de tiempo	21
2.1.6 Conservación de la masa.....	23
2.1.6.1 Principio del trabajo y la energía.....	23
2.1.6.1.1 Ecuación de Bernoulli sin considerar pérdidas de carga.....	23
2.1.6.1.2 Ecuación de Bernoulli considerando pérdidas de carga.....	25
2.1.6.1.3 Pérdidas de energía por fricción	25
2.1.6.1.3.1 Flujo laminar	25

2.1.6.1.3.2	Flujo turbulento	26
2.1.6.1.3.3	Factor de fricción.....	27
2.1.6.1.4	Ecuaciones empíricas	28
2.1.6.1.5	Pérdidas menores de energía.....	30
2.1.6.2	Líneas de gradiente hidráulico y gradiente de energía	33
2.2	Líneas de conducción de agua.....	34
2.2.1	Conducción por bombeo	35
2.2.2	Conducción por gravedad	35
2.2.3	Conducción combinada (por bombeo-gravedad)	35
2.3	Generación de bolsas de aire en conductos a presión	36
2.3.1	Causas	36
2.3.2	Consecuencias	37
2.4	Presencia de aire y los fenómenos transitorios.....	40
2.4.1	Golpe de Ariete.....	40
2.4.2	Consecuencias	41
2.5	Purgas en conductos a presión.....	42
2.5.1	Necesidad de purgas	42
2.5.2	Consecuencias de la falta de limpieza en un conducto a presión	42
2.6	Mecanismos para eliminación de bolsas de aire.....	43
2.6.1	Válvulas de aire y otros.....	43
2.6.2	Selección válvulas de aire	43
2.6.3	Localización de válvulas de aire.....	44
2.6.4	Efectividad	45
2.7	Mecanismos para purgas de conductos a presión.....	46
2.7.1	Válvulas y otros	46
2.7.2	Localización	46
2.7.3	Efectividad	47
2.7.4	Sistemas de bombeo.....	47
2.7.5	Tipos de bombas.....	47
2.7.6	Hidráulica del bombeo.....	48
2.7.6.1	Bernoulli.....	48
2.7.6.2	Curvas características.....	49
2.7.6.3	Punto de operación del sistema de bombeo	50
2.7.6.4	Eficiencia de la bomba.....	51
2.7.6.5	Cavitación	52

CAPÍTULO 3: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MODELO HIDRÁULICO	54
3.1 Diseño del modelo hidráulico de laboratorio	54
3.1.1 Curva de operación del sistema.....	55
3.1.1.1 Pérdidas de energía por fricción (h _{fi})	55
3.1.1.2 Pérdidas menores de energía (h _m).....	56
3.1.2 Selección de la bomba hidráulica	59
3.1.2.1 Potencia de la bomba	59
3.1.2.2 Curva de operación de la bomba	59
3.1.2.3 Punto de operación	62
3.1.2.4 Selección válvula de aire.....	63
3.1.2.4.1 Ubicación bolsas de aire	63
3.2 Planos de diseño	64
3.2.1 Dimensión del tablero.....	64
3.2.2 Dimensión de tuberías PVC 1” y mangueras 1”	66
3.2.3 Plano de despiece: ubicación de accesorios	67
3.2.3.1 Lista de accesorios para trayectoria.....	68
3.3 Construcción del modelo.....	69
3.3.1 Construcción del tablero	69
3.3.2 Conexión de bomba al sistema de tuberías y a tanques de almacenamiento. 70	
3.3.3 Unión de tuberías, mangueras y accesorios	72
3.3.4 Colocación de caudalímetro digital	74
3.3.5 Instalación de válvulas de aire.....	75
3.3.6 Colocación de agarraderas	77
3.3.7 Colocación de collarines con acoples para piezómetros y manómetros... 78	
3.3.8 Instalación de accesorios para realización de purga del sistema.....	78
3.3.9 Unión de tuberías y accesorios para realización de purga del sistema	79
3.3.10 Modelo hidráulico.....	80
3.4 Partes del modelo terminado	80
3.4.1 Bomba Foras PE50F, tubería de succión e impulsión 1”.....	80
3.4.2 Válvula Check vertical 1”	81
3.4.3 Válvula de bola 1” (alivio).....	81
3.4.4 Válvula de bola 1” (línea principal).....	82
3.4.5 Mangueras 1” y Tubos PVC 1”	82
3.4.6 Codos PVC 90° 1”	83

3.4.7	Codos PVC 45° 1”	83
3.5	Verificación del funcionamiento del modelo hidráulico.....	84
3.6	Manual de operación y mantenimiento del modelo hidráulico	88
3.6.1	Encendido del Equipo	88
3.6.2	Control de caudal en la línea principal	92
	93
3.7	Medición de Presiones	93
3.8.	Medición de Caudal	98
3.9.	Apagado del Equipo y purga del sistema.....	101
3.10.	Limpieza del Equipo	101
3.11.	Solución de Problemas Frecuentes.....	101
3.12.	Recomendaciones.....	102
CAPÍTULO 4: PRÁCTICAS DE LABORATORIO		103
4.1	Selección de los ensayos a realizar	103
4.2	Guía de laboratorio	103
4.2.1	PRÁCTICA 1	103
4.2.2	PRÁCTICA 2	128
4.2.3	PRÁCTICA 3	139
4.2.4	PRÁCTICA 4	151
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS		162
5.1	Discusión sobre los resultados con y sin la operación de válvulas de aire	162
5.2	Discusión sobre los resultados de purgas en el sistema	163
5.3	Análisis de los efectos en la presión, potencia y energía de una línea de conducción con y sin el accionar de las válvulas de aire.....	165
5.4	Análisis de las consecuencias operacionales y de costos al utilizar válvulas de aire	166
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		168
6.1	Conclusiones.....	168
6.2	Recomendaciones	170
Bibliografía.....		172

Lista de figuras

Figura 1. Influencia de la temperatura en la viscosidad absoluta. (Machuca Chiguano & Yépez Fajardo, 2009).....	17
Figura 2. Tubería de dos secciones con flujo incompresible. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	20
Figura 3. Caracterización de la tasa de flujo volumétrica (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	22
Figura 4. Sección de Tubería con flujo de agua y diámetro variable. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	24
Figura 5. Diagrama de Moody. (Martin D., 2008)	27
Figura 6. Ensanchamiento gradual. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)	32
Figura 7. LGH y LE en un sistema de flujo de agua en una tubería a presión. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	34
Figura 8. Puntos de separación y acumulación de aire (García Mares, 2015)	36
Figura 9. Causas principales de la presencia de aire en sistemas de tuberías. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	37
Figura 10. Acumulación de bolsas de aire en sistemas a gravedad (García Sánchez, 2013)	38
Figura 11. Acumulación de bolsas de aire en sistemas por bombeo (García Sánchez, 2013)	38
Figura 12. Fuerzas actuantes en bolsas de aire estacionarias en tramos descendentes. (García Sánchez, 2013)	39
Figura 13. Retorno de bolsas de aire (García Sánchez, 2013).....	39
Figura 14. Golpe de Ariete en tuberías a presión. (Camacho Ramírez & Meza Reina, 2017)	41
Figura 15. Funciones de una válvula de aire en una línea de conducción de agua potable. (Iglesias-Rey, Fuertes-Miquel, García-Mares, & Martínez-Solano, 2016).....	43
Figura 16. Pendientes mínimas recomendadas. (Zamorano Bear, 2017, pág. 36)	45
Figura 17. Efectividad válvulas de aire. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez) (Thomas, 2003)	46
Figura 18. Sistema típico de bombeo. (Rodríguez Ayala, 2014)	47
Figura 22. Ejemplo Curvas Características. (Rodríguez Ayala, 2014).....	49
Figura 23. Punto de operación de un sistema de bombeo con caudal constante. (Rodríguez Ayala, 2014).....	50
Figura 24. Punto de operación de un sistema de bombeo con caudal variable. (Rodríguez Ayala, 2014).....	51
Figura 25. Proceso de cavitación en un fluido causado por caídas repentinas de presión. (The Process Piping, 2018)	52
Figura 26. Curva del sistema. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	59
Figura 27. Catálogo bomba FORAS PE50F. Curva de la bomba. (Foras, 2017, pág. 19)	60
Figura 28. Catálogo bomba FORAS PE50F. Datos curva de la bomba. (Foras, 2017, pág. 19).....	60
Figura 29. Curva de operación de la bomba (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	62

Figura 30. Punto de operación. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	62
Figura 31. Vista frontal tablero. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	64
Figura 32. Vista posterior tablero. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez) ...	64
Figura 33. Vista lateral tablero. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	65
Figura 34. Dimensión de tuberías y mangueras. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	66
Figura 35. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	67
Figura 36. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)...	110
Figura 37. Dimensión de tuberías y mangueras. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	130
Figura 38. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)...	131
Figura 39. Dimensión de tuberías y mangueras. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	141
Figura 40. Funciones de una válvula de aire en una línea de conducción de agua potable. (Iglesias-Rey, Fuertes-Miquel, García-Mares, & Martínez-Solano, 2016).....	152
Figura 41. Dimensión de tuberías y mangueras. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	154
Figura 42. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)...	155
Figura 43. Presión punto B con y sin válvulas de aire. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	166

Lista de fotografías

Fotografía 1. Colocación de ruedas. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	69
Fotografía 2. Pintura y lacado del tablero. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	69
Fotografía 3. Entrada de la bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	70
Fotografía 4. Orificios en los tanques para colocación de accesorios y tuberías. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	70
Fotografía 5. Unión tanques y bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	71
Fotografía 6. Unión tanques y bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	71
Fotografía 7. Unión tanques y bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	72
Fotografía 8. Bomba, tubería y accesorios. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	72
Fotografía 9. Tuberías y accesorios. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	73
Fotografía 10. Tuberías, mangueras y accesorios. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	73

Fotografía 11. Tuberías y accesorios, se incluyen grifos en los tanques. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	74
Fotografía 12. Sensor digital caudalímetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	74
Fotografía 13. Caudalímetro digital. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	75
Fotografía 14. Válvulas de aire. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	75
Fotografía 15. Válvulas de aire. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	76
Fotografía 16. Válvulas de aire. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	76
Fotografía 17. Agarraderas. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)...	77
Fotografía 18. Agarraderas. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)...	77
Fotografía 19. Collarines. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	78
Fotografía 20. Collarín purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	78
Fotografía 21. Tuberías y accesorios purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	79
Fotografía 22. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	79
Fotografía 23. Modelo hidráulico. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	80
Fotografía 24. Bomba Foras. Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	80
Fotografía 25. Válvula Check. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	81
Fotografía 26. Válvula de bola (alivio). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	81
Fotografía 27. Válvula de bola (línea principal). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	82
Fotografía 28. Mangueras y tubos PVC. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	82
Fotografía 29. Codo estándar a 90°. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	83
Fotografía 30. Codo estándar a 45°. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	83
Fotografía 31. Válvulas control caudal de entrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	88
Fotografía 32. Válvulas de Purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	89
Fotografía 33. Válvulas de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	90
Fotografía 34. Válvula de medición de presión. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	91
Fotografía 35. Válvula de interconexión de tanques. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	91

Fotografía 36. Botón de encendido del equipo. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	92
Fotografía 37. Válvula de regulación de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	93
Fotografía 38. Válvula de medición de presión. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	94
Fotografía 39. Válvula de regulación de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	94
Fotografía 40. Válvula de paso línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	95
Fotografía 41. Conexión del manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	95
Fotografía 42. Válvula de regulación de caudal y línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	96
Fotografía 43. Válvula medición de presión cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	96
Fotografía 44. Piezómetros tubulares de agua. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	97
Fotografía 45. Medición con manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	98
Fotografía 46. Válvula de interconexión de tanques cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	99
Fotografía 47. Tanque de almacenamiento (medición de volumen). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	99
Fotografía 48. Posición de válvulas de salida. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	100
Fotografía 49. Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	108
Fotografía 50. Manómetros. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	108
Fotografía 51. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	111
Fotografía 52. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	112
Fotografía 53. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	113
Fotografía 54. Válvula de medición de presión. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	114
Fotografía 55. Válvula de regulación de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	115
Fotografía 56. Válvula de paso línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	115
Fotografía 57. Conexión del manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	116
Fotografía 58. Válvula de regulación de caudal y línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	116
Fotografía 59. Válvula medición de presión cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	116

Fotografía 60. Piezómetros tubulares de agua. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	118
Fotografía 61. Medición con manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	118
Fotografía 62. Caudalímetro digital. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	119
Fotografía 63. Válvula de interconexión de tanques cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	120
Fotografía 64. Tanque de almacenamiento (medición de volumen). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	120
Fotografía 65. Posición de válvulas de salida. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	121
Fotografía 66Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	129
Fotografía 67. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	132
Fotografía 68. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	133
Fotografía 69. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	134
Fotografía 70. Válvula de entrada cerrada completamente. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	135
Fotografía 71. Válvula de salida. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	135
Fotografía 72. Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	140
Fotografía 73. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	142
Fotografía 74. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	143
Fotografía 75. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	144
Fotografía 76. Conexión del manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	145
Fotografía 77. Válvula de regulación de caudal y línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	145
Fotografía 78. Válvula medición de presión cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	146
Fotografía 79. Medición con manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	146
Fotografía 80. Caudalímetro digital. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	147
Fotografía 81. Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	153
Fotografía 82. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	156

Fotografía 83. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	157
Fotografía 84. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	158

Lista de tablas

Tabla 1. Unidades de Densidad relativa (Bueche & Hecht, 2007).....	15
Tabla 2. Unidades de Densidad (Bueche & Hecht, 2007)	15
Tabla 3. Unidades de viscosidad absoluta. (Bueche & Hecht, 2007).....	16
Tabla 4. Unidades de viscosidad cinemática. (Bueche & Hecht, 2007)	16
Tabla 5. Unidades de presión. (Bueche & Hecht, 2007).....	17
Tabla 6. Unidades de presión atmosférica. (Bueche & Hecht, 2007).....	18
Tabla 7. Unidades de presión manométrica. (Bueche & Hecht, 2007).....	18
Tabla 8. Unidades de presión de vacío. (Bueche & Hecht, 2007).....	18
Tabla 9. Unidades de caudal. (Bueche & Hecht, 2007).....	22
Tabla 10. Unidades de pérdida de fricción. (Bueche & Hecht, 2007).....	26
Tabla 11. Unidades de pérdida de fricción. (Bueche & Hecht, 2007).....	26
Tabla 12. Rugosidad absoluta de materiales. (Guarín R. & Flores G., 2013).....	27
Tabla 13. Factor de fricción flujo turbulento. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)	28
Tabla 14. Coeficiente de rugosidad. (Haestad Methods Staff, 2002).....	29
Tabla 15. Unidades de pérdidas menores. (Bueche & Hecht, 2007).....	30
Tabla 16. Pérdidas de carga en accesorios. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)	31
Tabla 17. Valores de K- Contracciones y ensanchamientos. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)	32
Tabla 18. Longitud equivalente en diámetros de tubería (Le/Di). (Mott, 2006, pág. 242)	33
Tabla 19. Coeficiente de Bunsen. (Serrano Rodríguez, 2010, pág. 4).....	44
Tabla 20. Ubicación bolsas de aire (Zamorano Bear, 2017, pág. 56).....	45
Tabla 21. Datos de entrada del agua. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	54
Tabla 22. Viscosidad cinemática. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	54
Tabla 23. Pérdidas de fricción. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	56
Tabla 24. Pérdidas por fricción variación de caudales. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	56
Tabla 25. Pérdidas menores. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	57
Tabla 26. Pérdidas menores variación de caudales. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	57
Tabla 27. Resumen pérdidas y TDH. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	58
Tabla 28. Puntos seleccionados para obtener los coeficientes A, B y C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	61

Tabla 29. Datos curva de operación de la bomba. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	61
Tabla 30. Comportamiento de las burbujas de aire según la pendiente y el caudal. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	63
Tabla 31. Lista de accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	68
Tabla 32. Pérdidas por fricción tramo succión-bomba. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	84
Tabla 33. Presión punto A. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	84
Tabla 34. Pérdidas por fricción tramo A-B. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	84
Tabla 35. Pérdidas menores tramo A-B. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	84
Tabla 36. Presión punto B. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	85
Tabla 37. Pérdidas por fricción tramo B-C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	85
Tabla 38. Pérdidas menores tramo B-C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	85
Tabla 39. Presión punto C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	85
Tabla 40. Pérdidas por fricción tramo C-G. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	86
Tabla 41. Pérdidas menores tramo B-F. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	86
Tabla 42. Presión punto G. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	86
Tabla 43. Comparación de resultados de presión. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	87
Tabla 44. Selección de ensayos. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez). ...	103
Tabla 45. Rugosidad absoluta de materiales. (Guarín R. & Flores G., 2013).....	105
Tabla 46. Factor de fricción flujo turbulento. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)	106
Tabla 47. Longitud equivalente en diámetros de tubería (Le/Di). (Mott, 2006, pág. 242)	107
Tabla 48. Viscosidad cinemática. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez) ..	123
Tabla 49. Resultados del llenado de tuberías con y sin la operación de válvulas de aire. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)	162
Tabla 50. Resultado de purgas en el sistema. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	163
Tabla 51. Resultados de los efectos en la funcionalidad de una línea de conducción con y sin válvulas de aire. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).....	165

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

“A nivel mundial se llega a involucrar los costos de hasta \$ 4.000 millones en energía para sistemas hidráulicos. Los sistemas de bombeo no han sido diseñados para mover aire, como consecuencia, existe mayor tiempo de operación y mayor costo” (A.R.I, 2012, pág. 116).

En caso de que exista aire en el sistema de conducción, se debe eliminar el aire para que los tubos puedan funcionar llenos de agua. La presencia de aire puede provocar el aumento de carga necesaria para lograr un caudal determinado. En las inclinaciones de los sistemas de conducción se pueden acumular bolsas de agua por la tendencia que el aire tiene a subir e ir en contra del flujo además de acumularse en accesorios y derivaciones. (Corcos, Aire en tuberías de agua, 2005, pág. 3)

Los elementos generalmente utilizados para el ingreso o salida de aire son las válvulas de aire. En la actualidad sirven de guía, los manuales como el American Water Works Association o catálogos de fabricantes, para la selección del diámetro adecuado de la válvula de aire y su ubicación óptima.

1.2 Justificación

El objetivo de una línea de conducción de agua, independientemente de su propósito, es transportar el fluido con las menores pérdidas de carga y lograr un modo de trabajo eficiente con los mayores beneficios al menor costo posible.

La acumulación de aire en la parte superior del área transversal del tubo de la línea de conducción genera que el área dispuesta para el líquido se reduzca y por ende se genere una mayor potencia en la bomba. La aplicación de válvulas de aire en una red de este tipo genera una mayor eficiencia. Por este motivo, el diseño y construcción del modelo hidráulico de una línea de conducción presurizada a escala ayudará a demostrar el beneficio en el funcionamiento general del sistema, y se podrá comprender, y analizar los fenómenos hidráulicos y el comportamiento del flujo y los componentes en dicha obra.

Este modelo permitirá entender el comportamiento de las válvulas de aire y de purga y sus funciones. Además, se podrá realizar una comparación de costos de operación del sistema equipado con válvulas analizando sus resultados, frente a un sistema típico convencional que carece de ellas. De igual manera, aportará al proyecto de la implementación del Laboratorio de Hidráulica y Sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil de la PUCE. En este modelo hidráulico se podrá realizar prácticas de laboratorio aportando a la enseñanza experimental de los estudiantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Construir mediante diseño un equipo de laboratorio que modele el funcionamiento de válvulas de aire y de purga en conductos a presión, para la realización de prácticas en las asignaturas de Mecánica de Fluidos, Hidráulica General y Sanitaria III: Agua Potable y Alcantarillado.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Describir los aspectos teóricos relacionados con conductos a presión, líneas de conducción, generación de bolsas de aire, purgas en conductos a presión y los medios para la eliminación de bolsas de aire y realización de limpieza en tuberías.
- Diseñar, construir y verificar el funcionamiento del equipo de laboratorio.
- Analizar los resultados obtenidos con el equipo con y sin la operación de válvulas de aire
- Desarrollar una guía de prácticas de laboratorio.

1.4 Metodología

El trabajo de titulación será exploratorio debido a que se pretende investigar sobre el efecto que causa la aplicación de válvulas de aire en el comportamiento hidráulico de un sistema de conducción y en su vaciado, mediante experimentación.

A continuación se enuncian ciertos conceptos necesarios:

- **AIRE ATRAPADO:** Bolsas de aire, burbujas de aire provocadas por distintas causas como las condiciones de aire disuelto, el aumento de temperatura, instalación incorrectamente diseñada. (Corcos, Aire en tuberías de agua, 2005, pág. 7)
- **CAVITACIÓN:** “Formación de cavidades en el flujo, llenos de aire y vapor de agua, debidas a la baja presión originada por la elevada velocidad.” (Ortiz Aguirre, 1996, pág. 39)
- **PÉRDIDAS POR FRICCIÓN:** pérdidas de energía del sistema causado por la fricción existente entre partículas del fluido y la cara interna de la tubería que lo transporta, así como entre las capas del fluido. (Ramírez, 2017, pág. 20)
- **PÉRDIDAS MENORES:** son producidas por cualquier obstáculo y accesorio que provoque una menor o mayor obstrucción al paso del flujo. (Ramírez, 2017, pág. 24)
- **VÁLVULAS DE AIRE:** Dispositivos que generalmente se colocan en los puntos altos de la conducción que se utilizan para mantener las presiones en la tubería o para acelerar su vaciado. (Méndez, 2007, pág. 110)

- **VÁLVULAS DE PURGA:** Dispositivos ubicados en los puntos bajos que permiten el vaciado del sistema de conducción. (Méndez, 2007, pág. 104)
- **MANÓMETRO:** Aparato mecánico utilizado para la medición de presión, el cual posee un ducto de metal doblado conectado a una aguja en su extremo para realizar mediciones. (Ramírez, 2017, pág. 11)
- **CAUDAL:** Es el volumen de agua que atraviesa una determinada sección transversal de un conducto abierto o cerrado, por unidad de tiempo. (Yambombo, 2012, pág. 8)
- **VÁLVULA CHECK:** Dispositivo mecánico que permite al flujo moverse en una sola dirección, evitando que el mismo regrese en la dirección contraria. (TLV, 2019)

1.5 Alcance

Se analizará la relación entre pérdidas de carga, potencia de la bomba y energía que consume el sistema de bombeo. Además, se analizará la relación del consumo de energía con el costo de operación, así como la relación existente entre las pérdidas de carga en el sistema y su costo de operación de bombeo y las consecuencias económicas que implica.

Se construirá el equipo de laboratorio en forma de tablero y se ubicará sus componentes según lo establecido en el diseño, para su posterior puesta en marcha en manera de pruebas para determinar su funcionamiento. En esta etapa se medirá el caudal, las pérdidas de carga en el sistema, la potencia de la bomba utilizando válvulas de aire y sin utilizarlas. Además, se verificará la eficacia de purga del sistema con las válvulas de purga previamente instaladas.

Se realizará una verificación de resultados, para dar inicio a la ejecución de guías de laboratorio y manual de uso del equipo.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Hidráulica de tuberías a presión

2.1.1 Propiedades físicas del fluido

2.1.1.1 Densidad relativa (γ).

“Representa la relación adimensional entre la densidad del líquido a cierta temperatura y la densidad del agua normalizada a 60°F o 15.6°C. Al redondear a 15.0°C no se introduce ningún error apreciable” (Young & Freedman, 2009).

$$\gamma = \frac{\rho_{LÍQUIDO}}{\rho_{AGUA}}$$

Donde,

$\rho_{LÍQUIDO}$: densidad del líquido (recomendable temperatura 15.0°C)

ρ_{AGUA} : densidad del agua (normalizada a 15.0°C)

Sistema de unidades	Unidad
SI	adimensional
Sistema ingles	adimensional

Tabla 1. Unidades de Densidad relativa (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.1.2 Densidad

“Una propiedad importante de cualquier material es su densidad, que se define como su masa por unidad de volumen” (Young & Freedman, 2009, pág. 458).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde,

ρ : densidad del fluido

m : masa

V : volumen

Sistema de unidades	Unidad
SI	Kg/m ³
Sistema ingles	Lb/pie ³

Tabla 2. Unidades de Densidad (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.1.3 Viscosidad

2.1.1.3.1 Viscosidad dinámica o absoluta (μ)

“La viscosidad absoluta es una propiedad de los fluidos que indica la mayor o menor resistencia que éstos ofrecen al movimiento de sus partículas cuando son sometidos a un esfuerzo cortante” (Machuca Chiguano & Yépez Fajardo, 2009, pág. 21).

$$\mu = \frac{S}{R} = \frac{F * e}{V * A}$$

Donde,

μ : viscosidad dinámica

S : esfuerzo cortante

R : tasa de corte

F : fuerza cortante

e : espesor lámina líquida

A : área

V : velocidad del fluido

Sistema de unidades	Unidad
SI	N*s/m, Pa*s
Sistema ingles	(lb*s)/pie ²

Tabla 3. Unidades de viscosidad absoluta. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.1.3.2 Viscosidad cinemática (ν).

“Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, ésta suele denotarse como ν ” (Machuca Chiguano & Yépez Fajardo, 2009, pág. 22).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde,

ν : viscosidad cinemática

μ : viscosidad dinámica

ρ : densidad del fluido

Sistema de unidades	Unidad
SI	m ² /s
Sistema ingles	pie ² /s

Tabla 4. Unidades de viscosidad cinemática. (Bueche & Hecht, 2007)

La viscosidad es fricción interna en un fluido. Las fuerzas viscosas se oponen al movimiento de una porción de un fluido en relación con otra, (...) Las viscosidades de todos los fluidos dependen mucho de la temperatura, aumentan para los gases y disminuyen para los líquidos al subir la temperatura. (Young & Freedman, 2009, pág. 473)

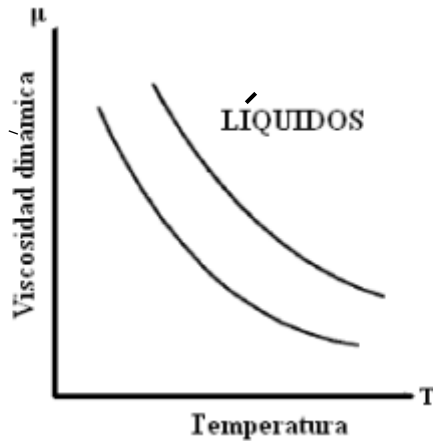


Figura 1. Influencia de la temperatura en la viscosidad absoluta. (Machuca Chiguano & Yépez Fajardo, 2009)

2.1.2 Tubería a presión

El transporte de agua a través del ensamblaje de tuberías circulares a presión transporta un flujo que se encuentra en constante contacto con las paredes internas de una tubería, lo que genera que dicho flujo este confinado, sin tener ningún tipo de obstrucción gaseosa entre las dos superficies en contacto. (Cadavid , 2006, pág. 6)

Esta característica de las tuberías genera que exista una fuerza por unidad de área en la interfaz expuesta, medible visualmente con la instalación de medidores de presión automáticos o bien con tubos piezómetros.

2.1.2.1 Presión

“Cuando un fluido (ya sea líquido o gas) está en reposo, ejerce una fuerza perpendicular a cualquier superficie en contacto con él, como la pared de un recipiente o un cuerpo sumergido en el fluido” (Young & Freedman, 2009, pág. 458). Cuando la presión es la misma en todos los puntos se define como:

$$P = \frac{F}{A}$$

Donde,

F : fuerza ejercida sobre área de contacto

A : área de contacto

Sistema de unidades	Unidad
SI	Pa; N /m ²
Sistema ingles	Psi; Lb /pulg ²

Tabla 5. Unidades de presión. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.2.1.1 Presión atmosférica (P_{atm})

La presión atmosférica P_a es la presión de la atmósfera terrestre, es decir, la presión en el fondo de este “mar” de aire en que vivimos. Esta presión varía con el estado del tiempo y con la altitud. La presión atmosférica normal al nivel del mar (valor medio) es 1 atmósfera (atm), definida exactamente como 101,325 Pa. (Young & Freedman, 2009, pág. 458)

Sistema de unidades	Unidad
SI	Pa ; N /m ²
Sistema ingles	Psi; Lb /pulg ²

Tabla 6. Unidades de presión atmosférica. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.2.1.2 Presión manométrica y Presión absoluta (P_{man} , P_{abs})

El exceso de presión más allá de la atmosférica suele llamarse presión manométrica, y la presión total se llama presión absoluta. Si la presión es menor que la atmosférica, como en un vacío parcial, la presión manométrica es negativa. (Young & Freedman, 2009)

$$P_{man} = P_{abs} - P_a$$

Sistema de unidades	Unidad
SI	Pa ; N /m ²
Sistema ingles	Psi; Lb /pulg ²

Tabla 7. Unidades de presión manométrica. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.2.1.3 Vacío P_{vac}

Se denomina vacío a los estados de presión de aire que se encuentra por debajo de la presión atmosférica. Aunque de una forma estricta, la denominación de vacío total corresponde a la ausencia total de presión; la presión atmosférica normal es la que se toma como presión de referencia. (Serrano, 2009)

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs}$$

Sistema de unidades	Unidad
SI	Pa ; N /m ²
Sistema ingles	Psi; Lb /pulg ²

Tabla 8. Unidades de presión de vacío. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.3 Flujo en tuberías a presión

2.1.3.1 Definición

Flujo es el cambio de posición relativa de las partículas de un fluido causado por la deformación unitaria que éste sufre al verse sometido a esfuerzos cortantes. Este movimiento se referencia respecto de un sistema de coordenadas el cual será el contorno

solido de la tubería. El flujo del agua es medible de acuerdo con el desplazamiento de una de sus partículas, la velocidad o aceleración que ésta puede adquirir. Estas cantidades físicas previamente señaladas, pueden variar o permanecer constantes tanto en el tiempo (permanente o variable) como en el espacio (uniforme o no uniforme). (Saldarriaga , 1998, pág. 1)

En el flujo de agua en una tubería existen tres fuerzas externas actuantes sobre el sistema: fuerzas gravitacionales, fuerzas de presión y fuerzas de fricción por rozamiento de superficies del fluido con las paredes de la tubería. Tanto las fuerzas gravitacionales como las de presión contribuyen a acelerar el sistema en movimiento, y las fuerzas de fricción se oponen a dicho movimiento, por lo que en el diseño de sistemas de conducción de agua juegan un rol fundamental para determinar diámetros y sistema de bombeo.

2.1.3.2 *Tipología*

- Flujo uniforme permanente

“Tanto la velocidad como la presión del flujo permanecen inmutables respecto del espacio y el tiempo, siendo el flujo base para análisis y presentación de ecuaciones para el diseño de sistemas de conducción de agua con tuberías a presión” (Saldarriaga , 1998, págs. 1,2).

Es preciso indicar que al no existir aceleración en el movimiento y teniendo en cuenta la segunda ley de Newton, debe existir un equilibrio de las fuerzas actuantes.

- Flujo uniforme no permanente

Tanto la velocidad como la presión del flujo varían únicamente respecto del tiempo, permaneciendo constantes con el espacio, lo que indica que es muy improbable encontrar este tipo de flujo en tuberías, al existir baja probabilidad de que exista cambios simultáneos a lo largo de la conducción a presión. (Saldarriaga , 1998, pág. 2)

- Flujo variado permanente

La presión y la velocidad no varían con el tiempo, pero si con el espacio y se presentan dos casos o subtipos de este flujo. Cuando el cambio de las características del flujo respecto al espacio es progresivo a lo largo del mismo se tiene un flujo gradualmente variado, por ejemplo, en contracciones o expansiones leves de tubería. Por otro lado, si el cambio se da de una manera brusca, se tiene

un flujo rápidamente variado como en el flujo a través de accesorios y bombas. (Saldarriaga , 1998, pág. 2)

- Flujo variado no permanente

“Se presenta cuando la presión y velocidad varían tanto en tiempo como en espacio, y en las tuberías se presenta dicho flujo al presentarse sobrepresiones causadas generalmente por el fenómeno del golpe de ariete” (Saldarriaga , 1998, pág. 2)

2.1.4 Características del Flujo incompresible

El flujo incompresible se tiene cuando las propiedades termodinámicas del fluido transportado no afectan apreciablemente su movimiento. Esto genera que no existan incrementos en la densidad del fluido al tener aumentos o pérdidas de presión. Cabe recalcar que, en un flujo incompresible, cada partícula del fluido esta expandida o comprimida con la variación de la presión a la que se somete, pero las características del flujo no presentan alteraciones. (Fay, 1998, pág. 502)

Al analizar un flujo incompresible de agua por medio de una tubería de dos tramos de diferente sección transversal, el volumen del fluido tiene que ser el mismo, pero en cuanto a la forma de acople del fluido en la tubería, éste se expandirá o comprimirá según el caso, por lo que volumen A es igual al volumen B.

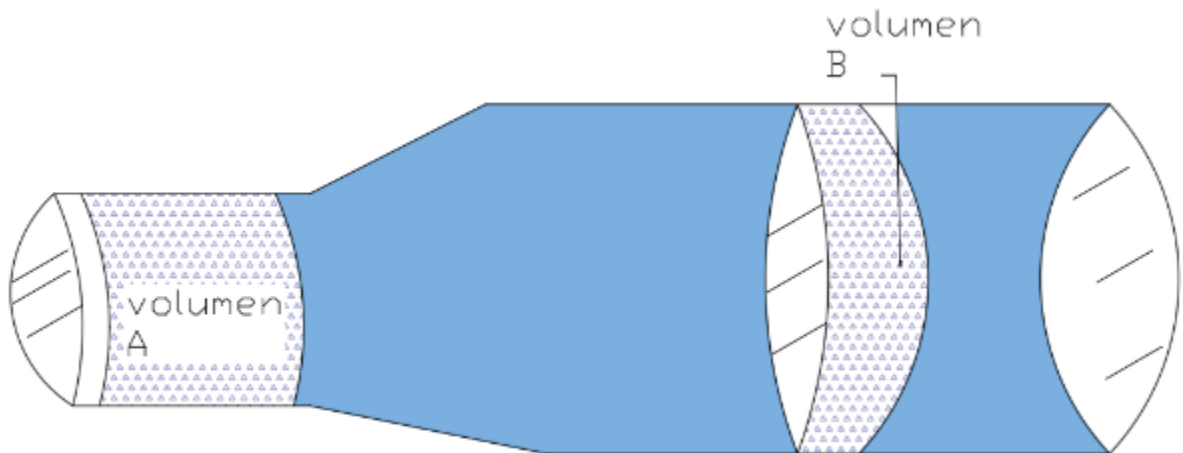


Figura 2. Tubería de dos secciones con flujo incompresible. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

2.1.5 *Funcionamiento hidráulico*

2.1.5.1 *Caracterización del flujo*

La forma del flujo y su comportamiento se pueden clasificar en flujo laminar y en flujo turbulento. El flujo laminar representa un caso ideal donde las partículas del agua tienen un recorrido fijo paralelo al de las demás partículas, lo que genera una velocidad constante. Por otro lado, cuando las partículas empiezan a variar sus trayectorias, se generan turbulencias y por tanto un aumento de velocidad del flujo. A esto se lo conoce como flujo turbulento. (Rival, 2018, pág. 3)

Para caracterizar el flujo existe un número adimensional que depende de la velocidad, del diámetro de la tubería y de la viscosidad cinemática del fluido, estableciendo que la transición de un flujo estacionario a un turbulento se da a una velocidad crítica. (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de fluidos, 2015, pág. 26)

$$R_e = \frac{VD\rho}{\mu}$$

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$$R_e = \frac{D * V}{v}$$

Donde,

R_e : número de Reynolds (adimensional)

D: diámetro interno de la tubería

V: velocidad del flujo de agua

v: viscosidad cinemática

μ : viscosidad dinámica

ρ : densidad

2.1.5.2 *Tasa de flujo por unidad de tiempo*

La cantidad de volumen de agua que pasa por la sección de una tubería en un tiempo determinado se lo conoce como caudal Q, es entonces una tasa del flujo de agua que pasará por una sección uniforme de la tubería. (Khan Academy, 2019)



Figura 3. Caracterización de la tasa de flujo volumétrica (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

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

Donde,

Q : caudal o tasa de flujo volumétrico

V : volumen del flujo en análisis

t : tiempo

Pero si se tiene en cuenta que:

$$V = A * \Delta L \quad \wedge \quad v = \frac{\Delta L}{t}$$

Donde,

A : área de la sección transversal del flujo

ΔL : longitud de estudio de la tubería

v : velocidad del flujo

Entonces se puede definir al caudal de un fluido incompresible como:

$$Q = A * v \rightarrow \left[\frac{\text{unidad de volumen}}{\text{unidad de tiempo}} \right]$$

Sistema de unidades	Unidad
SI	m ³ /s
Sistema ingles	pie ³ /s

Tabla 9. Unidades de caudal. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.6 Conservación de la masa

Para un flujo incompresible y estable de agua estable, la ley de la conservación de la masa hace referencia al principio de continuidad, que indica que el flujo de agua que ingresa por una sección es exactamente igual al flujo que sale. (Larock, Jeppson, & Watters, Taylor & Francis Group an informa business, 1999, p. 188)

$$Q = \int_{A_1}^{A_2} v dA = v_1 * A_1 - v_2 * A_2$$
$$Q = \text{constante}$$

Entonces en dos puntos de estudio de la tubería:

$$Q_1 = Q_2$$
$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2$$

Donde,

Q: descarga volumétrica del flujo en una sección transversal de tubería

A₁: área sección transversal a la entrada

A₂: área sección transversal a la entrada

v₁: velocidad de entrada

v₂: velocidad de salida

Debido a esta característica de los flujos incompresibles, si la sección transversal de una tubería disminuye la velocidad del flujo deberá aumentar para mantener el flujo volumétrico constante.

2.1.6.1 Principio del trabajo y la energía

2.1.6.1.1 Ecuación de Bernoulli sin considerar pérdidas de carga

La forma básica de entender el comportamiento del flujo de agua entre dos puntos dentro de una tubería es aplicando el principio del trabajo y la energía, donde la energía interna del sistema es igual al trabajo externo realizado por las fuerzas que se aplican a este. (Beléndez, Acústica, Fluidos y Termodinámica, 1992, pág. 43)

La única fuerza que genera trabajo externo es la presión a la que están sometidos los puntos en estudio. Además, al existir un trabajo sobre las partículas del flujo, el sistema presenta variaciones entre los dos puntos, tanto en su energía cinética como potencial, si se considera la velocidad del flujo y la altura al que se somete cada punto en estudio respecto a un nivel referencial, como se ve en la Figura 4.

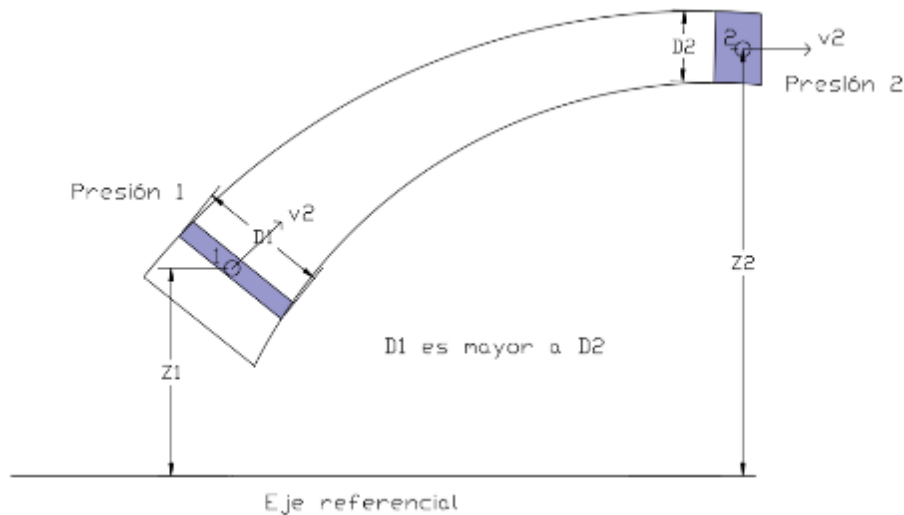


Figura 4. Sección de Tubería con flujo de agua y diámetro variable. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

“La ecuación de Bernoulli es la representación matemática del intercambio de energía que presenta un sistema de flujo de agua dentro de una tubería entre dos puntos determinados” (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de fluidos, 2015, pág. 108).

Si se tiene en cuenta la aplicabilidad del principio del trabajo y de la energía se puede entablar una relación entre la presión a la que está sometida el flujo, la velocidad y la altura de los dos puntos de análisis. (Sánchez, Bladé, & Puertas, 2005)

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g * z_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g * z_2$$

Si se divide la expresión para la gravedad para obtener la ecuación en términos de peso específico:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = 0$$

Donde,

$\frac{p}{\gamma}$: carga de presión estática en relación con el peso específico del fluido.

$\frac{v^2}{2g}$: carga de velocidad proveniente de la energía cinética del sistema.

z: carga de altura proveniente de la energía potencial del sistema.

2.1.6.1.2 Ecuación de Bernoulli considerando pérdidas de carga

Es importante recalcar que la ecuación previamente mostrada es una representación ideal de un sistema de flujo de agua debido a que entre los puntos en análisis no existe variación entre la energía total en el punto de inicio y en el final, lo que indica que el sistema carece de pérdidas de energía existentes por la fricción y por la presencia de accesorios. Dada la complejidad en la distribución de accesorios y de conductos en un sistema real de conducción de agua con tuberías a presión, es necesario considerar dichas pérdidas en la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) + \sum \text{Pérdidas de carga totales del sistema}$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \right) = \sum \text{Pérdidas de carga totales del sistema}$$

“La letra p es la carga de presión estática a la que se encuentra sometida la partícula en estudio y es medible con tubos piezométricos o manómetros” (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de fluidos, 2015, pág. 107).

2.1.6.1.3 Pérdidas de energía por fricción

Las pérdidas de carga o energía son la suma de todos los términos que representan formas de energía no utilizables. Las pérdidas por fricción son causadas por un aumento de temperatura, transferencia de calor debido a la viscosidad o fricción entre las superficies de contacto. (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de fluidos, 2015, pág. 111)

Para poder determinar las pérdidas de energía por fricción, se debe conocer la característica del flujo calculando el número de Reynolds.

2.1.6.1.3.1 Flujo laminar

“El flujo laminar es un flujo estable y ordenado, es decir, es un flujo sin mezclado significativo de las partículas, pero con importantes esfuerzos cortantes viscosos” (Potter, Wiggert, & Bassem, Mecánica de fluidos, 2012, pág. 274). Este flujo se da cuando las velocidades son bajas o las viscosidades son altas. Al tener estas características se tiene la relación de Hagen-Poiseuille para determinar la pérdida de energía.

$$h_f = \frac{32\mu LV}{\gamma D^2}$$

Donde,

h_f : pérdida de energía

μ : viscosidad dinámica

L : longitud de la tubería

D : diámetro de la tubería

γ : peso específico del fluido

V : velocidad

Sistema de unidades	Unidad
SI	m
Sistema ingles	pie

Tabla 10. Unidades de pérdida de fricción. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.6.1.3.2 Flujo turbulento

“El flujo turbulento es caótico e impredecible, por lo tanto, el flujo varía irregularmente de modo que su velocidad y presión muestran una variación aleatoria” (Potter, Wiggert, & Bassem, Mecánica de fluidos, 2012, pág. 292). Para determinar la pérdida de energía de este tipo de flujo se utiliza la fórmula de Darcy-Weisbach.

Esta fórmula es utilizada para el análisis de sistemas de tuberías a presión, enfocándose principalmente en las pérdidas por fricción.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = f \frac{L Q^2}{D 2gA^2}$$

Donde,

L : longitud de la tubería.

D : diámetro

V : velocidad

Q : caudal

A : área

f : factor de fricción

Sistema de unidades	Unidad
SI	m
Sistema ingles	pie

Tabla 11. Unidades de pérdida de fricción. (Bueche & Hecht, 2007)

2.1.6.1.3.3 Factor de fricción

El factor de fricción se lo obtiene en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa (e/D) dependiendo del material con el que se trabaje. El factor de fricción se determina con el diagrama de Moody.

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Tabla 12. Rugosidad absoluta de materiales. (Guarín R. & Flores G., 2013)

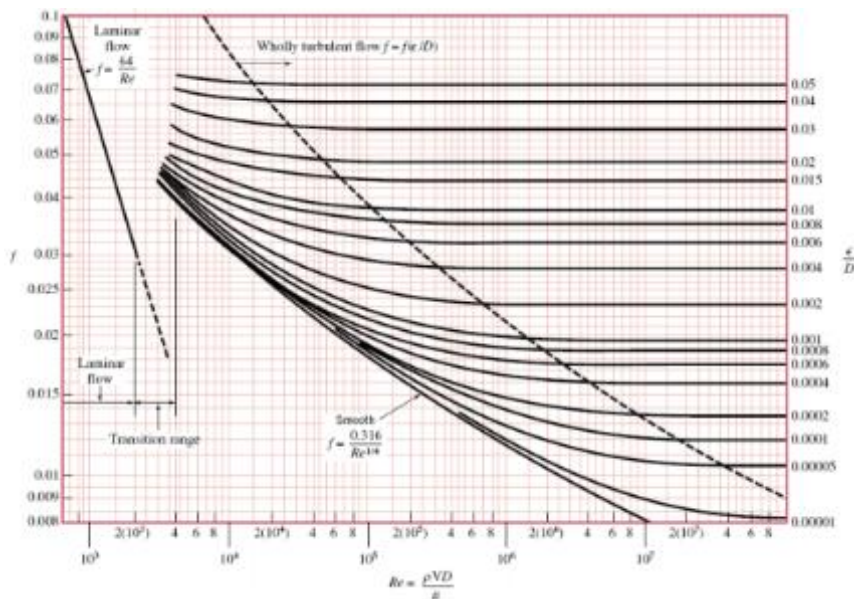


Figura 5. Diagrama de Moody. (Martin D., 2008)

El factor de fricción para los distintos tipos de flujos se obtiene de la siguiente manera:

- Para flujo laminar en todas las tuberías y cualquier fluido, se tiene:

$$f = 64/Re$$

- En el caso de flujo turbulento se tienen los siguientes (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003):

TIPO DE TUBERÍA	ECUACIÓN PARA f
Rugosas o lisas	$f = 8\tau_o/\rho V^2$
Tuberías lisas (Blasius ha sugerido con número de Reynolds ente 3.000 y 100.000)	$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$
Tuberías lisas (Ecuación de von Karman modificada por Prandtl para valores de Re hasta 3.000)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0.8$
Tuberías rugosas	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(r_o/\varepsilon) + 1.74$
Todas las tuberías (Colebrook)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7 d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$

Tabla 13. Factor de fricción flujo turbulento. (Giles & Evett, *Mecánica de los fluidos e hidráulica*, 2003)

La ecuación de P. K. Swamee y A. K. Jainse sirve de igual manera para obtener el coeficiente de fricción f .

$$f = \frac{0.25}{\varepsilon \left(\log\left(\frac{D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) \right)^2}$$

“En la zona de turbulencia completa el número de Reynolds no tiene ningún efecto por lo tanto el factor de fricción en esta zona es” (Chulluncuy Centeno & Diaz Vivanco, 2019):

$$f = \frac{0.25}{\varepsilon \left(\log\left(\frac{D}{3.71}\right) \right)^2}$$

Estos valores serán similares a los obtenidos en el diagrama de Moody.

2.1.6.1.4 Ecuaciones empíricas

Las ecuaciones de Hazen-Williams y Manning son ecuaciones empíricas utilizadas en conductos cerrados, sin embargo, la fórmula de Manning se utiliza con más frecuencia en el flujo en canales abiertos.

La fórmula de Hazen-Williams se la utiliza cuando la longitud de la tubería es mayor a 2 pulgadas (5 cm) y su diámetro es menor a 6 pies (182 cm). Se debe considerar que la velocidad del flujo no debe ser superior a 10 pies/s (3 m/s) y que se trabaja con agua a 60°F (15°C). (Das, 2015, pág. 56)

$$Q = 0.849C_{HW} * A * R^{0.63} S^{0.54}$$

Donde,

C_{HW} : coeficiente de rugosidad Hazen-Williams

R : radio hidráulico A/P

A : área transversal

P : perímetro mojado

S : pendiente de energía hf/L

“A pesar de que se utilice la fórmula de Manning con mayor frecuencia en canales abiertos, se la ha aplicado en sistemas de alcantarillado y drenaje ante condiciones presurizadas” (Potter, Wiggert, & Bassem, Mecánica de fluidos, 2012, pág. 547).

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

Donde,

n : coeficiente de Manning

Material	Coeficiente de Manning n	Coef. Hazen-Williams C_H	Coef. Rugosidad Absoluta e (mm)
Asbesto cemento	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmaltado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrim.)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

Tabla 14. Coeficiente de rugosidad. (Haestad Methods Staff, 2002)

2.1.6.1.5 Pérdidas menores de energía

Las pérdidas menores o locales se presentan por interrupciones locales que pueden ocurrir a lo largo de la tubería o por cambios de geometría. Estas pérdidas locales se presentan debido a los accesorios del sistema como lo son las válvulas, codos, entre otros. (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de flúidos, 2015, pág. 545)

“Las pérdidas menores pueden ser mayores a las pérdidas por fricción cuando se tiene ensanchamiento o contracciones abruptas” (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de flúidos, 2015). Se debe tener en cuenta que cuando se trabaja con tubos de grandes longitudes, las pérdidas menores son despreciables. Generalmente la representación cuantitativa de esta pérdida depende de datos experimentales.

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Sistema de unidades	Unidad
SI	m
Sistema ingles	pie

Tabla 15. Unidades de pérdidas menores. (Bueche & Hecht, 2007)

- Teniendo en cuenta que $V = \frac{Q}{A}$

Los coeficientes de K_L para los distintos accesorios son los siguientes:

(Subíndice 1 = aguas arriba y subíndice 2 = aguas abajo)

Accesorio	Pérdida de carga media
1. De depósito a tubería – conexión a ras de la pared (pérdida a la entrada)	$0,50 \frac{V_2^2}{2g}$
– tubería entrante	$1,00 \frac{V_2^2}{2g}$
– conexión abocinada	$0,05 \frac{V_2^2}{2g}$
2. De tubería a depósito (pérdida a la salida)	$1,00 \frac{V_1^2}{2g}$
3. Ensanchamiento brusco	$\frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$
4. Ensanchamiento gradual (véase Tabla 5)	$K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}$
5. Venturímetros, boquillas y orificios	$\left(\frac{1}{c_v^2} - 1\right) \frac{V_2^2}{2g}$
6. Contracción brusca (véase Tabla 5)	$K_c \frac{V_2^2}{2g}$
7. Codos, accesorios, válvulas*	$K \frac{V^2}{2g}$
Algunos valores corrientes de K son:	
45°, codo	0,35 a 0,45
90°, codo	0,50 a 0,75
Tes	1,50 a 2,00
Válvulas de compuerta (abierta)	aprox. 0,25
Válvulas de control (abierta)	aprox. 3,0

Tabla 16. Pérdidas de carga en accesorios. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)

Tanto en la entrada como en la salida del flujo de agua en un conducto a presión se presentan pérdidas locales. Además, al presentarse la necesidad de usar distintos diámetros, se requiere el uso de accesorios que causan una contracción o expansión brusca o gradual de la sección por la que pasa el flujo, lo que genera pérdida local de energía. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003, pág. 249)

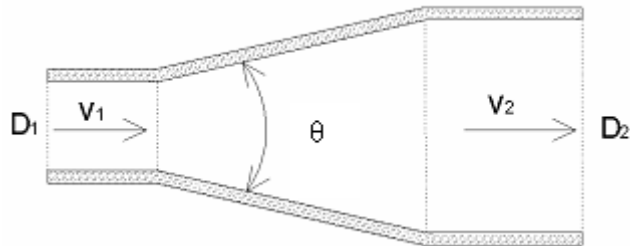


Figura 6. Ensanchamiento gradual. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)

VALORES DE K^*
Contracciones y ensanchamientos

Contracción brusca		Ensanchamiento gradual para un ángulo total del cono						
d_1/d_2	K_c	4°	10°	15°	20°	30°	50°	60°
1,2	0,08	0,02	0,04	0,09	0,16	0,25	0,35	0,37
1,4	0,17	0,03	0,06	0,12	0,23	0,36	0,50	0,53
1,6	0,26	0,03	0,07	0,14	0,26	0,42	0,57	0,61
1,8	0,34	0,04	0,07	0,15	0,28	0,44	0,61	0,65
2,0	0,37	0,04	0,07	0,16	0,29	0,46	0,63	0,68
2,5	0,41	0,04	0,08	0,16	0,30	0,48	0,65	0,70
3,0	0,43	0,04	0,08	0,16	0,31	0,48	0,66	0,71
4,0	0,45	0,04	0,08	0,16	0,31	0,49	0,67	0,72
5,0	0,46	0,04	0,08	0,16	0,31	0,50	0,67	0,72

* Valores tomados de King, *Handbook of Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company.

Tabla 17. Valores de K - Contracciones y ensanchamientos. (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003)

Para lograr determinar exactamente el valor de K_L se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$K_L = \left(\frac{Le}{Di}\right) * f_T$$

Donde,

Le : longitud equivalente

Di : diámetro interno de la tubería

f_T : factor de fricción en la zona de turbulencia completa

Los valores de $\left(\frac{L_e}{D_i}\right)$ se presentan en la tabla a continuación.

TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, L_e/D

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doblez de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

Tabla 18. Longitud equivalente en diámetros de tubería (L_e/D_i). (Mott, 2006, pág. 242)

2.1.6.2 Líneas de gradiente hidráulico y gradiente de energía

Es posible representar el sistema estudiado gráficamente en el plano, donde el eje de las abscisas representa longitud de tubería y el eje de las ordenadas indica la energía o carga existente. La suma de los términos $\left(\frac{p}{\gamma} + z\right)$ en cada punto de aplicación de análisis se

denomina carga hidráulica, y la cota de elevación a la que se llegue en el plano establecido con la carga hidráulica, marcará el paso de la línea de gradiente hidráulico. (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de fluidos, 2015, pág. 146)

Una vez establecida la línea de gradiente hidráulico entre los puntos en estudio, se puede añadir a cada cota del punto 1 y 2 la carga de velocidad presente en el sistema en cada punto, para de esta manera obtener las coordenadas a las que pasará la línea del gradiente de energía. (Pazmiño, Vivas, Tafur, & Ordóñez, 2017)

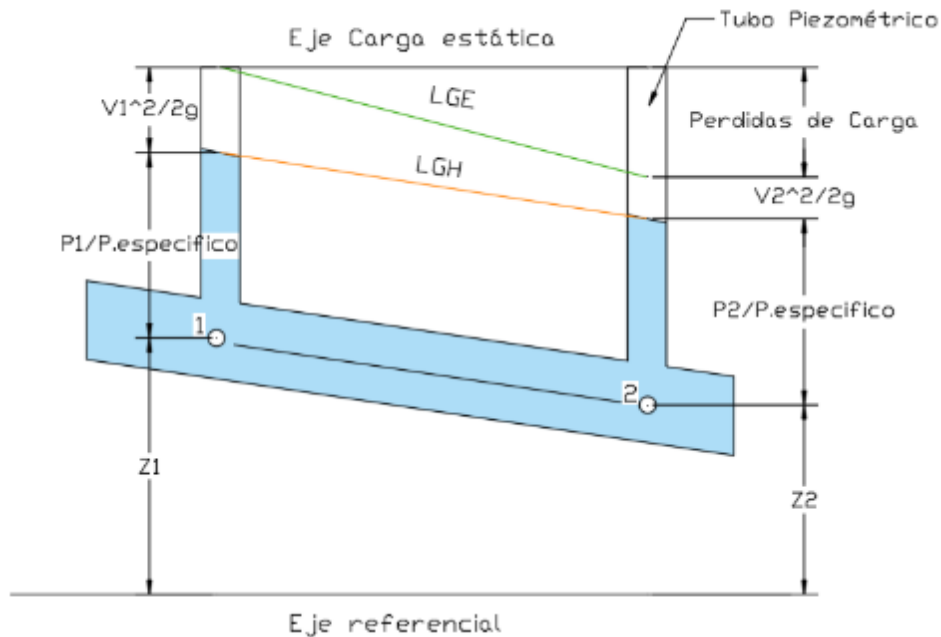


Figura 7. LGH y LE en un sistema de flujo de agua en una tubería a presión. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

El mismo concepto es aplicable para una conducción simple de agua potable entre dos reservorios.

2.2 Líneas de conducción de agua

Una línea de conducción sirve para llevar agua desde la captación hasta la planta potabilizadora o reservorio, puede ser diseñada a gravedad, por bombeo o combinado. Las líneas a presión pueden presentar mayor cantidad de fallas a comparación de las líneas a gravedad, esto se debe a que muchas veces el acceso para realizar el mantenimiento es limitado por lo tanto no se lo realiza de manera adecuada.

Se debe tener presente que cuando la línea de conducción pasa por un desnivel de terreno se debe instalar cámaras rompe presión. En el caso de tener un terreno muy accidentado, se pueden presentar bolsas de aire por lo cual se instala válvulas de aire en las zonas altas. Finalmente, cuando el terreno presenta pendientes y contrapendientes es recomendable utilizar válvulas de purga. (Care Perú, 2001, pág. 21)

“Tradicionalmente para las líneas de conducción de agua potable se pueden utilizar tuberías de fibrocemento, acero dúctil, hierro fundido, hormigón pretensado, acero, polietileno y cloruro de polivinilo más conocido como PVC” (Water Environment Research Foundation, 2015).

2.2.1 Conducción por bombeo

“Este tipo de conducción se presenta cuando la fuente de abastecimiento tiene una elevación menor a la altura piezométrica que es necesaria en el punto de entrega” (Comisión Nacional del Agua, 2016, pág. 2). “Se recomienda este tipo de conducción en sistemas de agua potable pequeño, debido a que se genera una conducción corta sin necesidad de seguir una pendiente fija” (Aguirre Morales, Abastecimiento de Agua para comunidades rurales, 2015, pág. 16).

2.2.2 Conducción por gravedad

La conducción por gravedad se presenta cuando la fuente de abastecimiento tiene una elevación mayor a la altura piezométrica que es necesaria en el punto de entrega. La topografía es favorable para que la conducción se pueda realizar sin necesidad de bombeo o energía adicional, haciéndolo de manera segura. Este tipo de conducción presenta bajos costos de mantenimiento y energía, su operación es sencilla, y los cambios de presión son reducidos. (Comisión Nacional del Agua, 2016, pág. 2)

Los canales abiertos y conductos cerrados sin presión son ejemplos de este tipo de conducción, debido a que aprovechan la carga estática existente. Se desea siempre trabajar con este tipo de conducción, siendo este el óptimo e ideal.

Para el diseño de este tipo de conducción se debe tener en cuenta:

En el caso de que sea necesario cerrar el sistema por mantenimiento, es necesario colocar más cerca a la captación una válvula de cierre evitando de esta manera sobrepresiones. De igual manera es necesario colocar una válvula de aspiración a continuación de la válvula de cierre para que no exista succión o vacío dentro de la tubería. (García, Sistemas de conducción de agua para la región altoandina, 2013, pág. 112)

2.2.3 Conducción combinada (por bombeo-gravedad)

Se presenta cuando la topografía obliga a que la conducción cruce por partes más altas con relación a la superficie del agua del tanque de regularización, es recomendable colocar un tanque intermedio. De esta manera se trabaja por bombeo en la primera parte y en la segunda por gravedad. (Comisión Nacional del Agua, 2016, pág. 3)

2.3 Generación de bolsas de aire en conductos a presión

En el diseño de una línea de conducción de agua potable se considera únicamente que se transporta un flujo de agua pura, despreciando posibles filtraciones de aire en el sistema. A mayor escala, subestimar el efecto causante de la presencia de aire en el sistema puede ser fatal, al punto de tener roturas de tubería o fallos en el sistema. (Pozos-Estrada, Fuentes, Sánchez, Rodal, & de Luna, Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo, 2016, pág. 80)

“En acueductos a bombeo o impulsiones, la presencia de aire se puede reflejar en un incremento en el consumo de energía eléctrica y la reducción del caudal” (Pozos-Estrada, Fuentes, Sánchez, Rodal, & de Luna, Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo, 2016).

El aire tiene gran compresibilidad y baja densidad, por lo cual las bolsas de aire se acumulan en la parte alta de los sistemas de conducción a presión provocando daños en las tuberías y problemas de trabajo eficiente en los sistemas. (García Mares, 2015, pág. 2)

2.3.1 Causas

“El aire dentro del sistema hidráulico no puede ser expulsado completamente, sin embargo, el conocer las causas por las cuales se genera ayuda a plantearse maneras de reducir el volumen de aire atrapado” (García Sánchez, 2013, pág. 1).

Existen tres causas en las cuales se pueden resumir el motivo por el cual se puede tener presencia de aire dentro de un sistema de tuberías.

La primera es que el agua tiene capacidad de llevar disuelto 2% de aire, es proporcional a la presión y la temperatura. Por lo tanto, si la presión disminuye la temperatura aumenta, obligando a que el aire sea liberado y se acumule en los puntos altos de la tubería o en cambios violentos de pendiente. (García Mares, 2015, pág. 1)

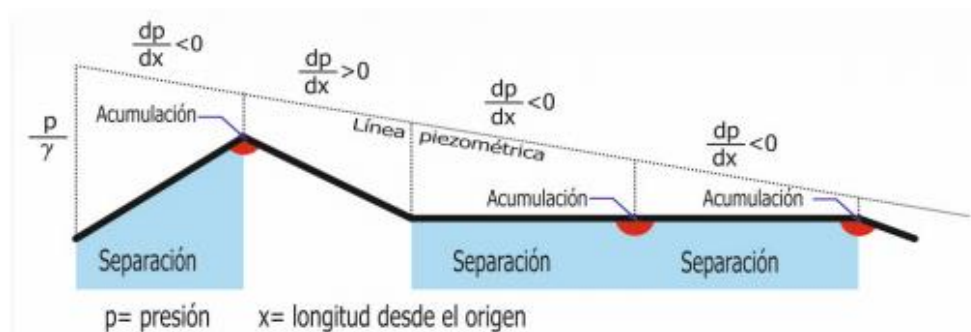


Figura 8. Puntos de separación y acumulación de aire (García Mares, 2015)

La segunda causa son las entradas accidentales de aire que pueden existir en normal funcionamiento del sistema como lo es en las aspiraciones de las estaciones de bombeo o por la existencia de pequeñas grietas e incluso por el funcionamiento de equipos mecánicos. (García Mares, 2015, pág. 2)

“Las bombas pueden introducir entre 5% y 10% de aire por volumen de agua al generar succión. El aire también puede ingresar al sistema de tuberías debido a sellos defectuosos en juntas o válvulas” (Pozos-Estrada, Fuentes, Sánchez, Rodal, & de Luna, Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo, 2016, pág. 80).

“Finalmente, la tercera causa es la paralización temporal del servicio debido a cortes de energía o mantenimiento. Las interrupciones pueden ser programadas o no, causando que el rango de presiones piezométricas se modifique y que aparezcan presiones negativas” (García Mares, 2015, pág. 3).

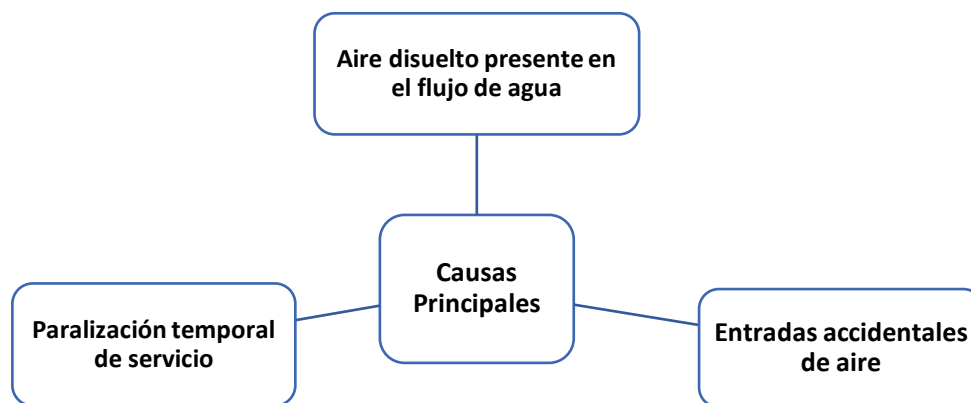


Figura 9. Causas principales de la presencia de aire en sistemas de tuberías. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

2.3.2 Consecuencias

Las bolsas de aire que se acumulan en el interior de un ducto a presión reducen la sección transversal de la tubería, induciendo pérdidas extra de carga, generando una disminución de rendimiento en el sistema de bombeo. Adicionalmente, se ha observado que se presentan problemas de ruido y vibraciones, corrosión interna por la presencia de oxígeno y poca eficiencia en el uso de filtros. (Iglesias-Rey, Fuertes-Miquel, García-Mares, & Martínez-Solano, 2016, pág. 1)

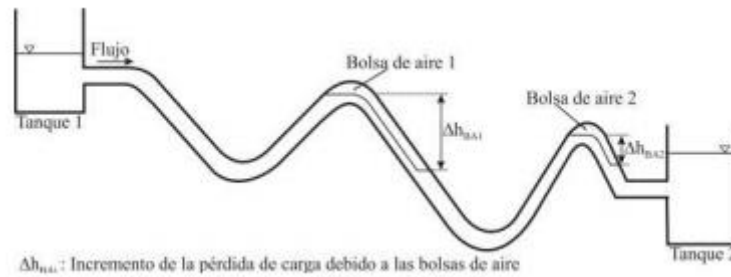


Figura 10. Acumulación de bolsas de aire en sistemas a gravedad (García Sánchez, 2013)

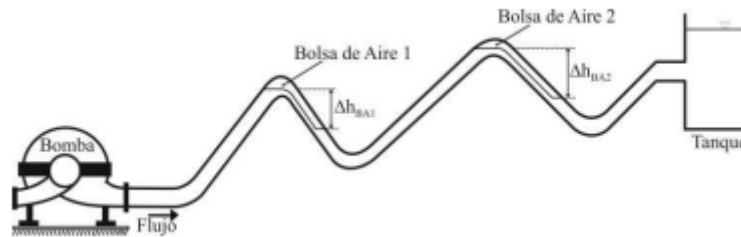


Figura 11. Acumulación de bolsas de aire en sistemas por bombeo (García Sánchez, 2013)

La cantidad de aire atrapado influye directamente al grado de afectación del sistema, y es necesario analizar aspectos técnicos como económicos teniendo en cuenta la escala del proyecto. Por tanto, la presencia de aire en el flujo es causante de los siguientes problemas:

- Errores de medición en equipos contadores y caudalímetros.
- Produce vibraciones, cavitación, desgaste de equipos y fallas estructurales.
- Disminución de densidad y aumento de elasticidad del fluido.
- Disminución de la capacidad de transporte y eficiencia de filtros.
- Cambios en la velocidad del flujo.
- Reducción de eficiencia del sistema de bombeo, pérdidas económicas y desperdicio del recurso hídrico.
- Incremento de los picos de respuesta de presión durante un transitorio hidráulico.

Es necesario entender que un daño estructural del sistema requiere una mayor atención dado los problemas que este suceso puede generar, en especial en proyectos de gran escala como abastecimiento de agua potable, donde la paralización prolongada del servicio puede causar malestar en los clientes y pérdidas económicas significativas para la empresa a cargo. Además, la acumulación de aire puede generar sobrepresión en el momento de arranque del sistema, provocando daños o rupturas en los puntos más frágiles. (García Mares, 2015, pág. 4)

De igual manera es necesario tener en cuenta ciertos fenómenos causados por la presencia de aire en el sistema. Cuando se tiene pendientes descendentes el agua trata de empujar el aire hacia abajo. Si la fuerza de flotación del aire es igual a la fuerza de arrastre del

agua, el aire atrapado puede encontrarse estacionario dentro del tubo por lo tanto la fuerza de fricción es casi nula. (García Sánchez, 2013, pág. 1)

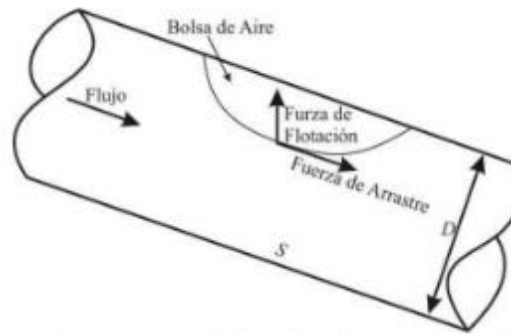


Figura 12. Fuerzas actuantes en bolsas de aire estacionarias en tramos descendentes. (García Sánchez, 2013)

Una bolsa de aire atrapada en un conducto alcanza una longitud de varias veces el diámetro de la tubería. En las pendientes descendentes el aire acumulado puede estabilizarse además de presentar un salto hidráulico aguas abajo, en el extremo del conducto (García Sánchez, 2013, pág. 4)

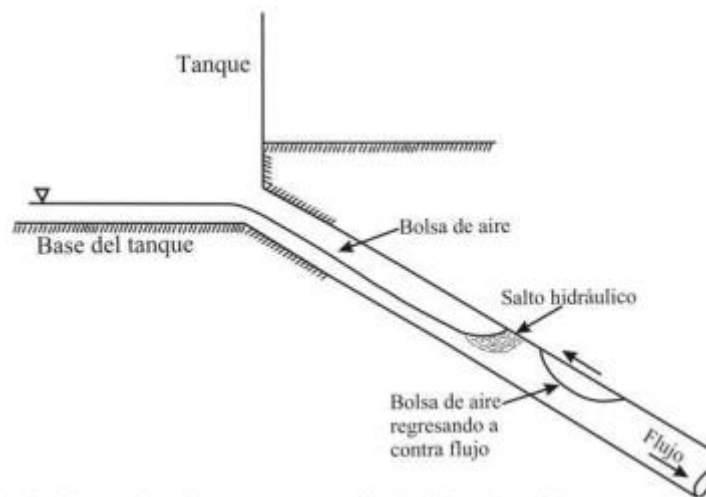


Figura 13. Retorno de bolsas de aire (García Sánchez, 2013)

El salto hidráulico causa turbulencia lo cual permite que el agua y el aire se mezclen, el aire que ingresa puede generar burbujas o bolsas de aire de gran tamaño por lo que la fuerza de flotación será mayor a la fuerza de arrastre del agua. Mientras siga ingresando más aire, las burbujas y bolsas de aire tendrán mayor tamaño, por lo tanto, será mayor la fuerza de flotación y su velocidad será menor. El retorno de las bolsas de aire puede llevar a la destrucción completa o parcial de un sistema hidráulico (García Sánchez, 2013, pág. 4).

2.4 Presencia de aire y los fenómenos transitorios

Para un óptimo diseño y operación de una línea presurizada de conducción de agua potable se considera y se espera un régimen de flujo permanente, sin embargo, existen ciertos escenarios en su funcionamiento en el que no se cumple dicho cometido, y se genera un régimen de transición en el flujo. Manipulaciones bruscas de válvulas y arranques o paro de los sistemas de bombeo, independientemente de si su ejecución es accidental o no, generan transición en el régimen del flujo provocando variaciones notables en las condiciones hidráulicas medibles, como la velocidad y presión, en cada punto de la conducción. (Conagua, México D.F, 2016, pág. 1)

Entonces a diferencia de un flujo permanente o estacionario, un flujo de régimen transitorio existe cuando sus parámetros hidráulicos varían en el tiempo. Dichos fenómenos se los clasifica según el intervalo de duración del transitorio:

Cuasi-estático: transitorio extremadamente lento en el que la variación de los parámetros se suscita en intervalos de horas, por lo que no es necesario tomar en cuenta la inercia del flujo ni las propiedades elásticas de la tubería ni del fluido para su el diseño de una conducción. (Conagua, México D.F, 2016, pág. 1)

Oscilación de masa: transitorio lento en el que se produce un cambio en los parámetros hidráulicos en intervalos de minutos y hasta un par de horas. Si bien el cambio de variables es significativo, no es necesario tener en cuenta propiedades elásticas del fluido y del conducto, sin embargo, se recomienda modelar el movimiento inercial del flujo dentro de la tubería. (Conagua, México D.F, 2016, pág. 1)

Golpe de ariete: transitorio vertiginoso generado por el cambio brusco en la velocidad del flujo, causado por cierre o apertura brusca de válvulas o arranque y paro de bombas. Se genera ondas de presión de periodos muy cortos a lo largo de la línea de conducción, por lo que es necesario tomar en cuenta efectos de elasticidad tanto del material de transporte como del fluido. (Conagua, México D.F, 2016, pág. 1)

2.4.1 *Golpe de Ariete*

“Con la variación brusca de velocidad del sistema se forman olas de presión a lo largo de la tubería” (Kodura & Weinerowska, Some Aspects of Physical and Numerical Modeling of Water Hammer in Pipelines, 2005, pág. 126).

Dicho fenómeno genera una sobrepresión no esperada en la tubería lo que hace indispensable el realizar una interacción entre propiedades del fluido (modulo bulk, fuerzas de fricción e inercia) y aspectos físicos de la tubería en uso (modulo bulk, dimensiones) para fines de diseño. (Kodura, An Analysis of the Impact of Valve Closure Time on the Course of Water Hammer, 2016, pág. 36)

Es necesario entender que la velocidad a la que se dispersa la onda generada a lo largo de la tubería es conocido con el término de “celeridad” y dependerá de los factores previamente mencionados tanto de la tubería como del fluido transportado. (Gandarillas Prieto, 2011, pág. 2)

Acto seguido a la sobrepresión se suscita una fase de depresión con ondas de baja presión. Este ciclo de ondas se produce a lo largo de la conducción en intervalos de tiempo cortos generando daños en la tubería.

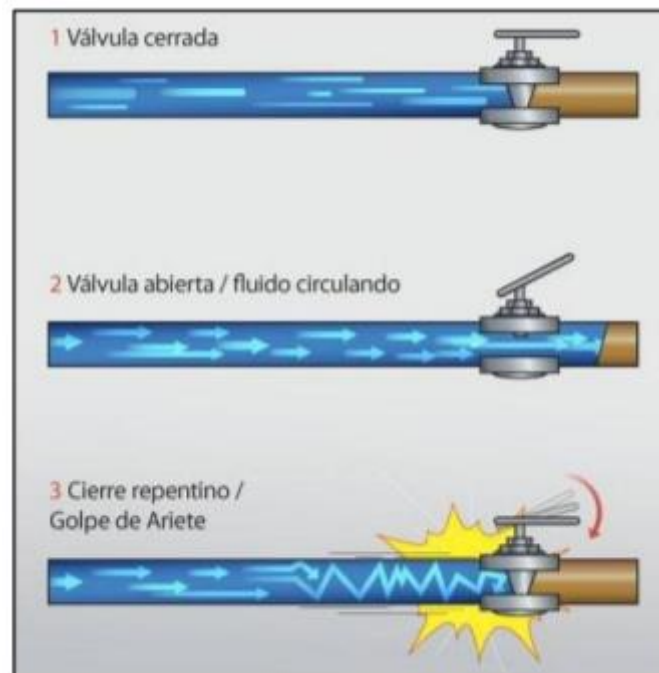


Figura 14. Golpe de Ariete en tuberías a presión. (Camacho Ramírez & Meza Reina, 2017)

2.4.2 Consecuencias

Cuando existe una detención inesperada del sistema de bombeo, además del golpe de ariete, se puede generar una “zona de cavitación”, donde se genera una separación del flujo aguas debajo de la descarga y la presión baja incluso más que la presión atmosférica. Acto seguido el líquido se vuelve gas, induciendo aire al sistema y generando los problemas ya analizados. (Gandarillas Prieto, 2011, p. 2)

Cuando esto ocurre se genera succión del fluido aguas abajo de la columna de aire y esta regresa a velocidades importantes chocando con el dispositivo de prevención de contraflujo y protector de la bomba generando daños en el sistema. Después se genera nuevamente la sobrepresión con el choque del flujo con la válvula de protección. Este fenómeno ocurre una y otra vez hasta que la fricción del flujo con la tubería disipe la energía y se detenga. (Gandarillas Prieto, 2011, pág. 2)

“Si existe un gran volumen de aire en el sistema, se desacelerará el flujo más rápido por lo que la magnitud del golpe de ariete será mayor con roturas y desplome de las tuberías” (Gandarillas Prieto, 2011, pág. 3).

2.5 Purgas en conductos a presión

El éxito del funcionamiento de una línea de conducción de agua recae en gran parte en el proceso de mantenimiento e inspección que se dispone en el proyecto. Para el mantenimiento es necesario realizar el vaciado de agua de las tuberías, mediante mecanismos de purga eficientes.

Si la conducción presenta pendientes muy grandes y variables, al momento de realizar el vaciado, se puede generar acumulación de sedimentos en las partes más bajas de la conducción. Para evitar taponamientos, es necesario colocar sistemas de vaciado con su localización en las cotas más bajas que se disponga, de tal forma que la purga de agua del sistema se realice integralmente. (Narváez, UIDE, 2011, pág. 65)

2.5.1 Necesidad de purgas

Cuando se requiere construir una línea de conducción de agua sobre una zona donde la topografía es muy irregular se genera cambios notorios de dirección ascendentes y descendentes en su trazado. En puntos bajos de la línea de conducción se puede presentar sedimentación de residuos sólidos, disminuyendo la sección transversal por la que pasa el flujo de agua, por lo que es conveniente la instalación de válvulas en dichos puntos para realizar purgas al sistema periódicamente. (Tandalla G., 2012, pág. 34)

2.5.2 Consecuencias de la falta de limpieza en un conducto a presión

El mantenimiento y limpieza de una conducción a presión es vital para que al trabajar el sistema lo haga de forma eficiente. Es preciso aclarar que el intervalo de tiempo de ejecución de dicho mantenimiento dependerá de las cualidades del proyecto (volumen de manejo de fluido, materiales), pero será más corto y estricto cuando el sistema atraviese por topografía irregular que provoque que la tubería tenga pendientes fuertes y cambiantes, generando espacios de acumulación de sedimentos grandes, reduciendo el área del flujo del agua. (Organización Panamericana de la Salud, 2004, pág. 18)

Dicha obstrucción del diámetro interno de la tubería puede ser parcial o completa, generando daños en los puntos más vulnerables de la conducción (conexiones, tuberías corroídas) y provocando incluso la rotura de estas.

“La falta de limpieza de sedimentos puede provocar de igual manera un deterioro acelerado de los componentes mecánicos como las válvulas o las bombas, generando gastos no contemplados en el funcionamiento del sistema” (Rodríguez Ayala, 2014, pág. 45).

2.6 Mecanismos para eliminación de bolsas de aire

2.6.1 Válvulas de aire y otros

Las válvulas de aire son dispositivos hidromecánicos que permiten controlar el ingreso y salida de aire en un sistema hidráulico. Su instalación puede brindar al operario o responsable la posibilidad de controlar la formación y acumulación de las bolsas de aire, especialmente en los puntos altos del sistema de tuberías cuando se encuentra trabajando a presión. (Vayremex Mr., 2018, pág. 3)

Además, son eficientes en los sistemas presurizados de conducción de agua en el llenado de tuberías, al expulsar el aire interno de la tubería a través de sus orificios para tener únicamente fluido dentro de la conducción; en la operación del sistema a presión, al expulsar el aire acumulado en el sistema generando un trabajo más eficiente de la bomba; en el vaciado de tuberías al combatir la presión negativa generada al purgar el sistema, evitando la succión en la tubería induciendo aire al mismo. (Thomas, 2003, pág. 4)

“Las ventosas pueden ser de doble acción, al aliviar el sistema contra el aire y el vacío, o de triple acción generando alivio de presión, vacío y acción” (Plastigama, 2018, pág. 18).

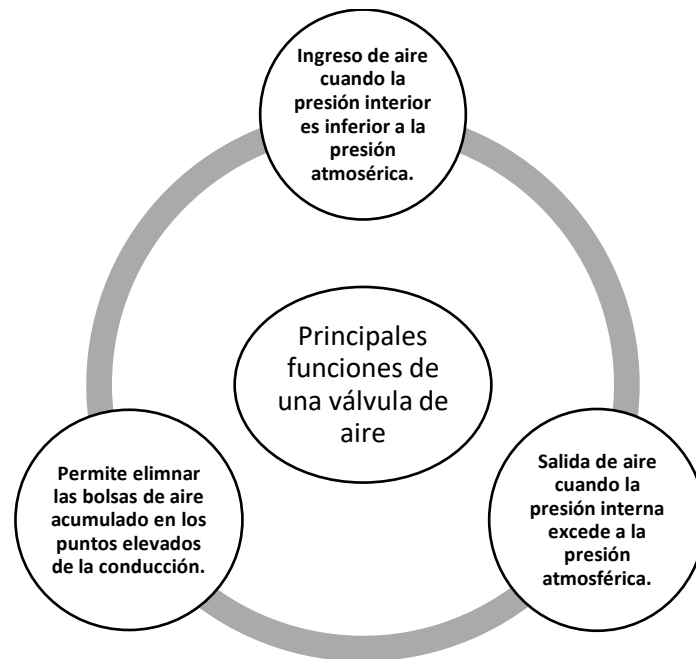


Figura 15. Funciones de una válvula de aire en una línea de conducción de agua potable. (Iglesias-Rey, Fuertes-Miquel, García-Mares, & Martínez-Solano, 2016)

2.6.2 Selección válvulas de aire

Se debe escoger el material de la válvula de aire, del revestimiento y del flotador; de acuerdo con el fluido con el cual se va a trabajar, las condiciones ambientales y tomando en cuenta que estos materiales deben ser resistentes y duraderos. (Gandarillas Prieto,

Problemas típicos de las ventosas, soluciones técnicas disponibles y criterios de selección de válvulas de aire, 2011, pág. 30)

Primero, se debe conocer que funciones se desea que realice la válvula de aire (ingreso y/o salida de aire), para luego proceder a realizar un buen dimensionamiento de la válvula de aire evitando una sobre dimensión y los problemas que esto puede conllevar en todo el sistema. (Gandarillas Prieto, Problemas típicos de las ventosas, soluciones técnicas disponibles y criterios de selección de válvulas de aire, 2011, pág. 30)

“Para el dimensionamiento de la válvula de aire es importante conocer el coeficiente de Bunsen (CB), el cual es la relación entre m³ de aire y m³ de agua (a presión atmosférica, la cantidad máxima de aire disuelto)” (Serrano Rodríguez, 2010, pág. 4)

°C	0	5	10	15	20	25	30
CB	0,0286	0,0252	0,0224	0,0201	0,0183	0,0167	0,0154

Tabla 19. Coeficiente de Bunsen. (Serrano Rodríguez, 2010, pág. 4)

Una vez determinado el coeficiente de Bunsen se puede calcular la cantidad de aire que puede liberar una conducción.

$$Q_a = CB * Q * \Delta p$$

Donde,

Q_a : cantidad de aire liberado (m³/minutos)

CB: coeficiente de Bunsen

Q: caudal (m³/minutos)

Δp : variación de presión (bar)

2.6.3 Localización de válvulas de aire

“La ubicación de las válvulas de aire, en una conducción de agua por bombeo, debe darse en un lugar de fácil acceso en las partes más elevadas del sistema” (Rios A. & Mustafá Iza, 2008, pág. 252).

Se puede realizar un desvío de la conducción principal y manipular su funcionamiento con una válvula de corte o bien incluirlo en la conducción.

Para ubicar las válvulas de aire se tiene que conocer donde se van a generar las bolsas de aire, considerando:

Cuando:	El aire:
$Q^2/Gd^5 < S$	Regresa a contra flujo.
$Q^2/Gd^5 > S$	Se mueve con y en el sentido del flujo.

Tabla 20. Ubicación bolsas de aire (Zamorano Bear, 2017, pág. 56)

Donde,

Q: caudal o gasto (m^3/s)

G: gravedad (m/s^2)

d: diámetro (m)

S: pendiente

Las válvulas de aire trabajan de manera correcta cuando el perfil es irregular y cuando se define la posición de las mismas. Lo más recomendable es que las pendientes ascendentes sean mayores al 0.2% y las descendentes, a 0.4%. Tomando esto en cuenta el aire puede acumularse en los puntos altos y ser evacuado con las válvulas de aire. (Zamorano Bear, 2017, pág. 36)

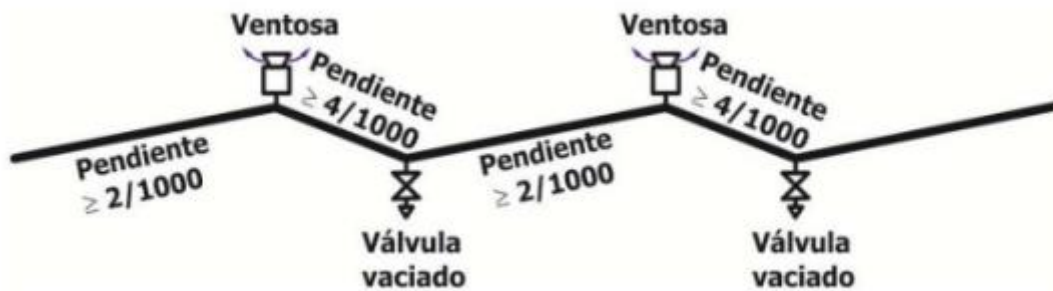


Figura 16. Pendientes mínimas recomendadas. (Zamorano Bear, 2017, pág. 36)

2.6.4 Efectividad

El aire en las tuberías disminuye la sección transversal de transporte de esta, generando un aumento en la velocidad provocando pérdidas de carga mayores. Se ha comprobado que las válvulas de aire, cuando han sido correctamente seleccionadas, además de disminuir las pérdidas de carga por evacuación de aire, generan un ahorro de consumo de energía por el sistema de bombeo. (A.R.I, 2012, pág. 11)

A continuación, se presenta una comparación entre la eficiencia de ductos a bombeo y el valor monetario que implica remover el aire atrapado del sistema hidráulico, donde:

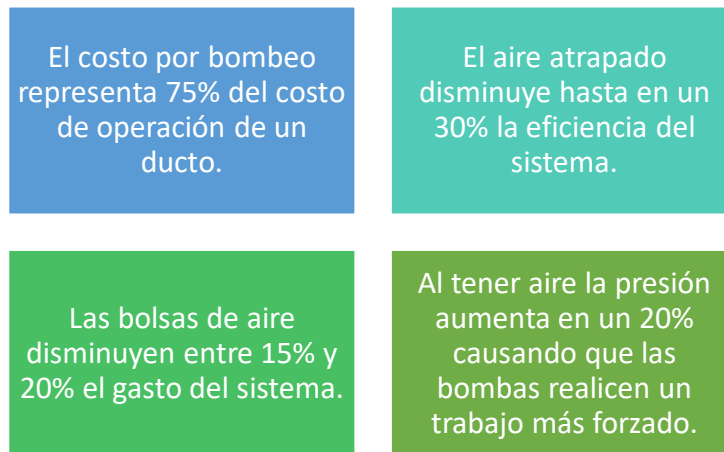


Figura 17. Efectividad válvulas de aire. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez) (Thomas, 2003)

“Algunas ventosas generan vaciados de tuberías más eficientes, evacuando todo el líquido y combatiendo el fenómeno del vacío en la tubería por presiones bajas de succión, evitando problemas de corrosión” (Plastigama, 2018).

2.7 Mecanismos para purgas de conductos a presión

2.7.1 Válvulas y otros

El vaciado de una conducción a presión se lo realiza mediante un mecanismo de purga que, generalmente, esta al final de la conducción o bien conectado a una salida de la línea principal. No existe un mismo tipo de sistema de purga, ya que este dependerá de las características del terreno, pero si dispondrá de un dispositivo de regulación del caudal, tuberías y accesorios.

Tanto en el funcionamiento como en el mantenimiento, la salida de vaciado debe poder ser manipulada mediante válvulas de compuerta. El material y tamaño de la válvula a instalar depende directamente de la presión a la que el sistema va a trabajar y por tanto depende indirectamente del propósito del proyecto.

2.7.2 Localización

Las válvulas de purga son dispositivos pertenecientes al mecanismo de vaciado del sistema, y deben colocarse lateralmente en sus puntos bajos, evitando así la sedimentación de materia que obstruya el paso del agua. Generalmente, la zona de vaciado inicia con una “tee” que permite la derivación del flujo hacia un tanque de despacho o bien un desagüe. (Sedapar, 2017, pág. 22)

2.7.3 Efectividad

“Un buen diseño de un sistema de purga es clave para garantizar el vaciado integral de la tubería, permitiendo incluso combatir de mejor forma los sedimentos no deseados” (Rios A. & Mustafá Iza, 2008, pág. 250).

“Permite realizar mantenimientos preventivos y forzados, lo que genera una mayor duración de sus componentes, del sistema de bombeo y de los accesorios. Además, se dispone de un sistema higiénico y totalmente funcional” (Chafra Barahona, 2016, pág. 66).

2.7.4 Sistemas de bombeo

El sistema de bombeo es un conjunto de elementos los cuales generan energía adicional y hacen posible el paso del fluido al aumentar la presión y velocidad cuando la topografía no sea favorable y la energía natural no es suficiente. (Tavera, 2013, pág. 88)

Para que funcione de manera correcta se requiere de distintos accesorios que aseguren su funcionalidad. (Rodríguez Ayala, 2014)

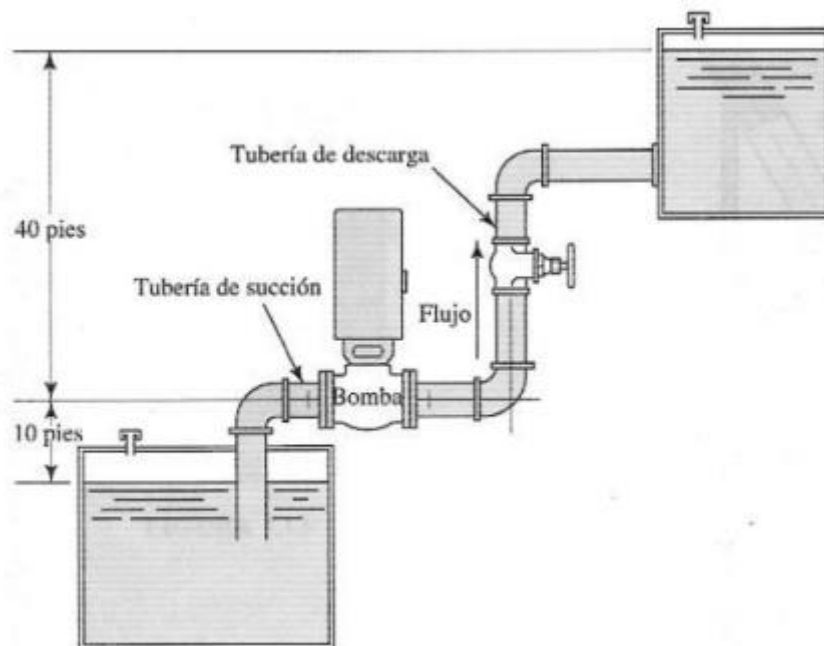


Figura 18. Sistema típico de bombeo. (Rodríguez Ayala, 2014)

2.7.5 Tipos de bombas

“Las bombas son máquinas que convierten la energía mecánica en hidráulica, impulsan el fluido a través de un aparato giratorio” (Rodríguez Ayala, 2014, pág. 22).

Se pueden clasificar de la siguiente manera:

Según el funcionamiento,

Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas:

- Principio hidrostático de funcionamiento
- El empuje de las paredes de las cámaras incrementa la presión al variar el volumen.
- Si el volumen máximo generado puede variar la bomba es de volumen variable, caso contrario es una bomba de volumen fijo.

Bombas rotodinámicas:

- Cuenta con álabes que al girar generan presiones en el fluido. El flujo es continuo.
- Se subdividen en radiales, axiales y diagonales.
- Principio hidrodinámico de funcionamiento

Según el tipo de accionamiento,

- Electrobomba: funciona con motor eléctrico.
- Motobomba: funciona con motor de combustión interna.
- Bombas neumáticas: funcionan con aire comprimido.
- Bombas de accionamiento hidráulico.
- Bombas manuales.

Al elegir una bomba, tomar en cuenta la capacidad y los detalles de la bomba a utilizar en el sistema. Para hacer más sencilla la elección de la bomba con la que se va a trabajar se debe conocer las condiciones hidráulicas del sistema, las condiciones del líquido y el presupuesto con el que se cuenta. (Rodríguez Ayala, 2014, pág. 25)

1. Se debe conocer el caudal, altura y el fluido con el que se va a trabajar.
2. Recurrir a las curvas características
3. Analizar las características de aspiración.
4. Determinar el material de la bomba
5. Determinar el tipo de bomba
6. Realizar una evaluación económica
7. Tomar en cuenta condiciones hidráulicas y topográficas.

2.7.6 *Hidráulica del bombeo*

2.7.6.1 *Bernoulli*

Al proveer energía extra al sistema hidráulico, la bomba debe ser tomada en cuenta en la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum \text{Pérdidas de carga totales del sistema} - H_B$$

Donde,

H_B : altura de bombeo

La altura de bombeo es la energía por unidad de peso del fluido proporcionada por la bomba al sistema (J/N)

La pérdida de energía se calcula utilizando la ecuación de Darcy Weisbach, además se toma en cuenta las pérdidas menores.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = f \frac{L Q^2}{D 2gA^2}$$

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

2.7.6.2 Curvas características

“Las bombas cuentan con un sistema electromecánico por lo cual la eficiencia energética debe cumplir con ciertos estándares. Se realizan distintos ensayos para caracterizar al comportamiento de la bomba, obteniendo las siguientes curvas” (Tavera, 2013, pág. 35):

- Altura (H) en función del caudal trasladado (Q).
- Potencia (P) en función del caudal trasladado (Q).
- Rendimiento energético en función del caudal (Q).

“Estas curvas se pueden obtener del fabricante, en caso de no contar con esta información se puede utilizar curvas de otra bomba con características similares (diámetro, tipo de impulsor, velocidad, etc.), para que sirvan de referencia” (Rodríguez Ayala, 2014, pág. 25).

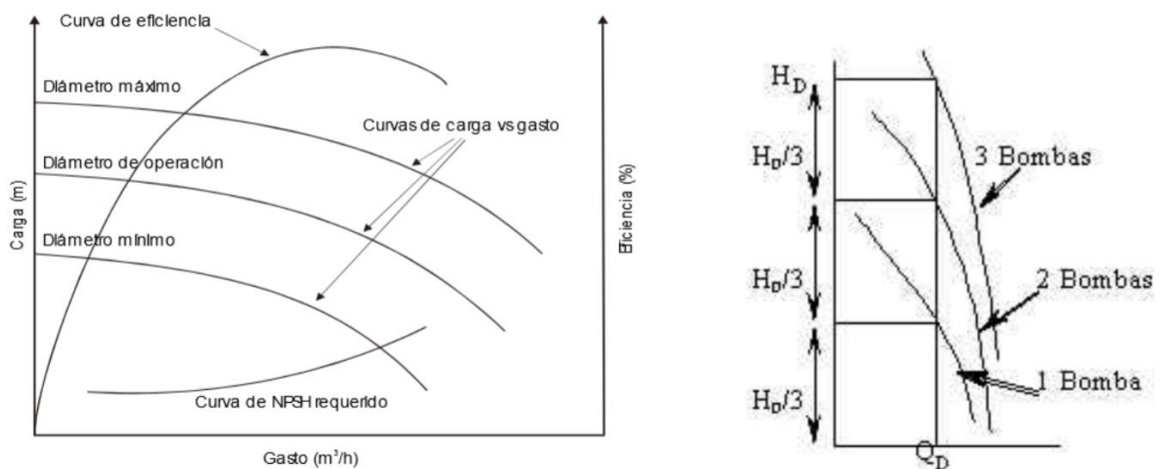


Figura 19. Ejemplo Curvas Características. (Rodríguez Ayala, 2014)

“En las bombas centrífugas la curva de altura piezométrica total (Hm) en función del caudal trasladado (Q) se puede obtener utilizando la siguiente fórmula” (Curimilma Rivera & Erreyes Medina, 2012, pág. 27).

$$H_m = A Q^2 + B Q + C$$

“Para obtener el valor numérico de A, B y C se debe trabajar con tres puntos de la curva de altura (H) en función del caudal trasladado (Q)” (Curimilma Rivera & Erreyes Medina, 2012, pág. 28)

2.7.6.3 Punto de operación del sistema de bombeo

Cuando se tiene un caudal constante el punto de operación se encuentra donde la carga generada por la bomba es similar a la del sistema de bombeo. En la gráfica de carga vs caudal el punto de operación se ubica donde se cruza la curva del diámetro de operación y la curva del sistema. (Rodríguez Ayala, 2014)

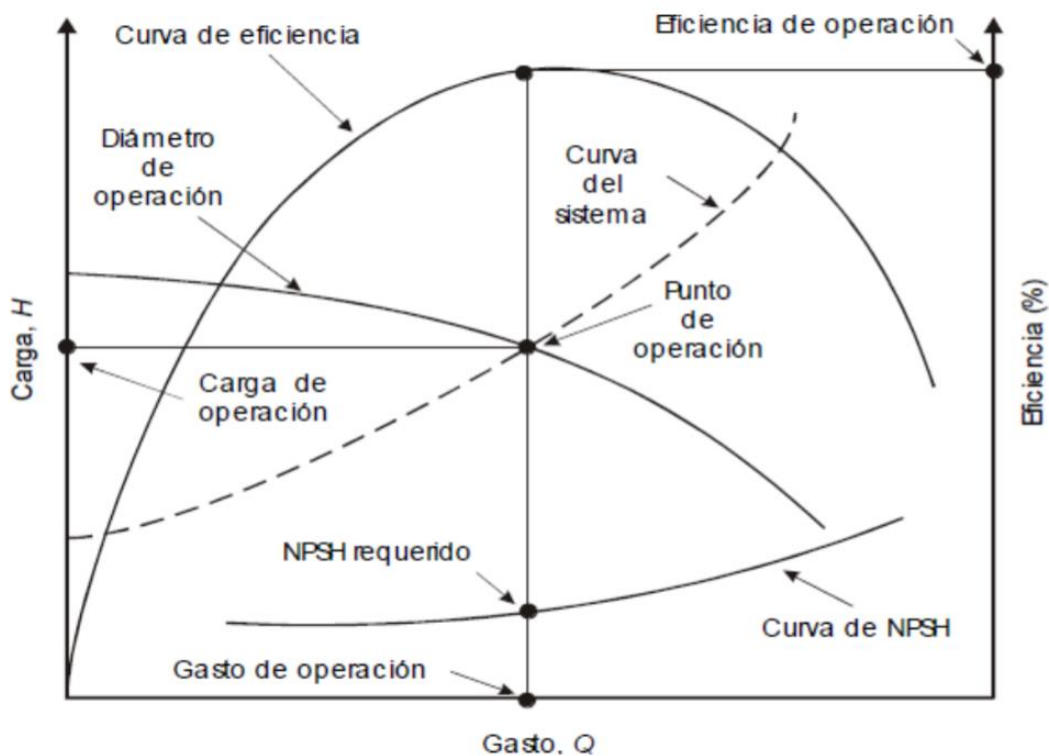


Figura 20. Punto de operación de un sistema de bombeo con caudal constante. (Rodríguez Ayala, 2014)

Por otro lado, al tener un caudal variable se trabaja con distintos puntos de operación donde se puede determinar la altura neta positiva en la aspiración (NPSH) y la eficiencia de la bomba.

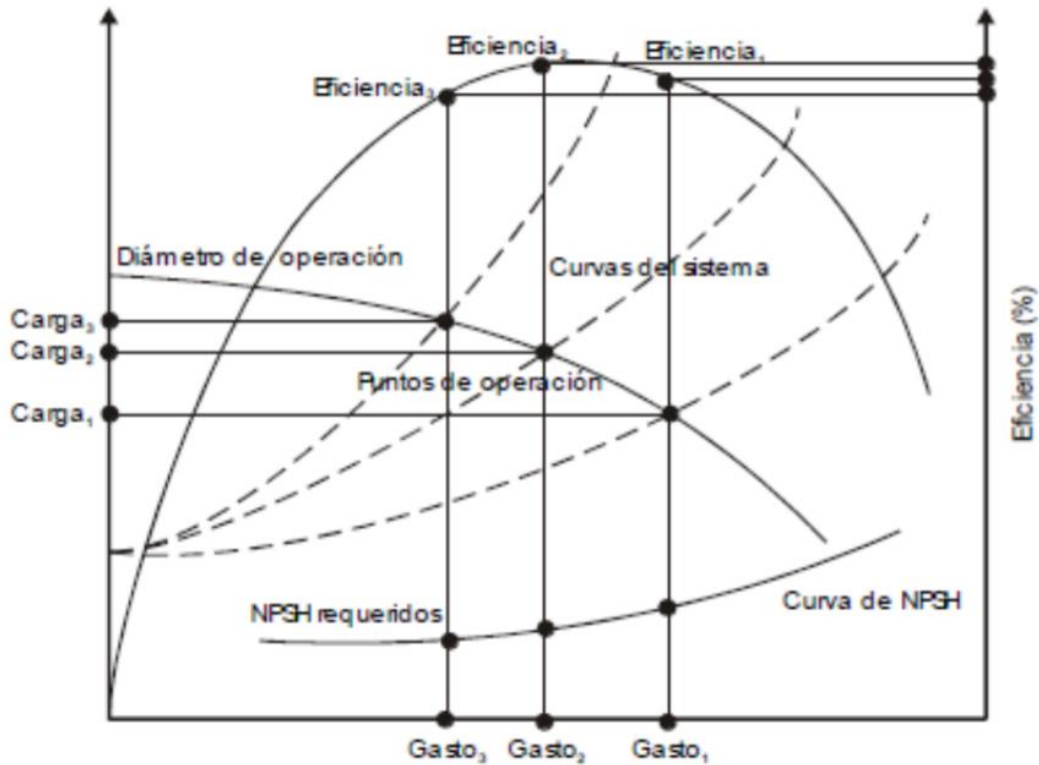


Figura 21. Punto de operación de un sistema de bombeo con caudal variable. (Rodríguez Ayala, 2014)

“Para que las bombas puedan trabajar con un caudal distinto al nominal es necesario controlar y regular el caudal. La manera más sencilla de realizar esto es la estrangulación de la tubería, abriendo y cerrando la válvula” (Rodríguez Ayala, 2014, pág. 24).

2.7.6.4 Eficiencia de la bomba

Si no se cuenta con las curvas características, se debe realizar lo siguiente:

- Establecer la potencia demandada por la bomba

$$P_{DB} = P_m * \eta_m$$

Donde,

P_{DB} : potencia demandada por la bomba (hp o Kw)

- Determinar la potencia hidráulica de la bomba

$$P_h = \gamma * Q * H$$

Donde,

P_h : potencia hidráulica (W)

γ : peso específico del agua (9807 N/m³)

Q : caudal ($\frac{m^3}{s}$)

H : carga total (m)

- Por lo tanto, la eficiencia de la bomba se determina como:

$$\eta_b = \frac{P_h}{P_{DB}}$$

2.7.6.5 Cavitación

“La cavitación es un fenómeno que se genera cuando la presión en un punto de la corriente es menor a la presión de saturación de vapor. Esto provoca que el líquido se evapore, generando burbujas” (Palma Jaramillo, 2010, pág. 24).

El fenómeno genera cavidades en el líquido por consecuencia de fuerzas actuantes causadas por caídas de presión localizadas. Se genera vaporización y una posterior condensación del fluido aguas abajo del punto donde se generó la caída de presión. Esto se presenta en forma de burbujas de vapor inmersas en el fluido que continua su movimiento. (Larson , 2005)

Al seguir el flujo del líquido, dichas burbujas se encuentran con presión más altas, lo que genera implosión brusca de las mismas. Implosiones repetitivas causan tensión cíclica localizada en las paredes de la tubería, en accesorios y en sistemas de bombeo, lo que genera desgaste y exposiciones prolongadas de dicho fenómeno puede causar daños severos y colapsos en el sistema. (ANSYS, Inc., 2019)

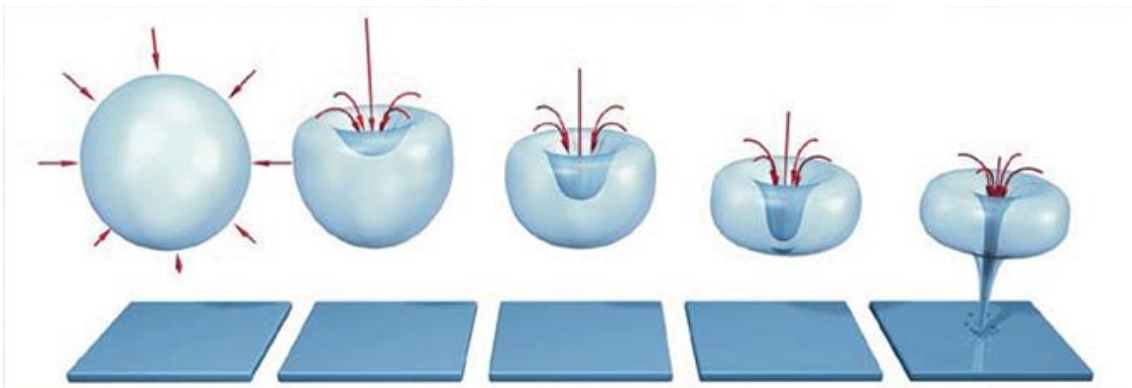


Figura 22. Proceso de cavitación en un fluido causado por caídas repentinas de presión. (The Process Piping, 2018)

Es casi imposible identificar con certeza la cavitación durante una prueba física hasta que se alcance niveles altos de presión y tanto el ruido como las vibraciones resultantes se vuelvan aparentes. (Palma Jaramillo, 2010)

“Cuando ocurre este fenómeno las bombas no cumplen de manera correcta y óptima con su trabajo, presentan fallas internas. Además, genera pérdidas de producción, fallas del equipo y puede provocar lesiones al personal” (Rodríguez Ayala, 2014, pág. 38).

“La manera más sencilla de reconocer la cavitación es el ruido que produce similar a un choque entre piedras, este ruido se genera debido a la condensación de las burbujas de vapor” (Palma Jaramillo, 2010, pág. 25).

Por todos los problemas y daños que la cavitación puede causar, el personal encargado debe estar capacitado para detectar los signos de este fenómeno y poder controlarlo o eliminarlo.

La cavitación por succión de bombeo es controlada por la altura de succión positiva neta (NPSH), la cual debe cumplir con la siguiente condición:

$$NPSH_{Disp} > NPSH_{Req}$$

Donde,

$NPSH_{Disp}$ se obtiene de la instalación del sistema de bombeo.

$NPSH_{Req}$ es la que proporciona el fabricante.

La $NPSH_{Disp}$ es entonces una medida que presenta la cercanía del fluido a la cavitación.

Su valor depende de características geométricas en la instalación y del fluido que se va a transportar. Si se referencia el sistema desde el nivel de succión que es el nivel del agua, se define la $NPSH_{Disp}$ como:

$$NPSH_{Disp} = \frac{P_c}{\gamma} - Z_c - h_{fc} - \frac{P_v}{\gamma}$$

Donde,

P_c : presión a nivel de succión

Z_c : altura geométrica de succión

h_{fc} : pérdida de carga en la línea de succión

P_v : presión de vapor del agua

CAPÍTULO 3: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL MODELO HIDRÁULICO

3.1 Diseño del modelo hidráulico de laboratorio

Como el fluido a transportar es agua, se considera para el diseño los siguientes datos:

	Nomenclatura	Valor
<i>Temperatura</i>	T°	16 °C
<i>Peso específico del agua</i>	Γ	9798 N/m ³ .
<i>Masa específica del agua</i>	P	999.10 kg/m ³
<i>Viscosidad dinámica</i>	μ	1.13 x 10 ⁻⁴ (kg*s)/m ² .
<i>Viscosidad cinemática</i>	Y	1.11 x 10 ⁻⁶ m ² /s.

Tabla 21. Datos de entrada del agua. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

NOTA: Existe un rango de variación de temperatura entre 15°C y 20°C que depende de la temperatura del día, al momento de realizar la toma de presiones se trabajó con una temperatura de 16°C.

Además, se considera la siguiente tabla:

VISCOSIDAD CINEMÁTICA	
T (°C)	v (m²/s)
8	1,39E-06
9	1,35E-06
10	1,31E-06
11	1,27E-06
12	1,24E-06
13	1,20E-06
14	1,17E-06
15	1,14E-06
16	1,11E-03
17	1,08E-06
18	1,05E-06
19	1,03E-06
20	1,00E-06
21	9,80E-07
22	9,57E-07
23	9,35E-07
24	9,14E-07
25	8,93E-07

Tabla 22. Viscosidad cinemática. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.1.1 Curva de operación del sistema

Para el diseño de la curva del sistema, se tiene en cuenta la única trayectoria del modelo simulando una línea de conducción. Esta trayectoria permitirá calcular la potencia de la bomba.

Utilizando la ecuación de Bernoulli, la cual analiza la energía del sistema entre dos puntos:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \sum \text{Pérdidas de carga totales del sistema} - H_B$$

Donde,

$p_1 = 0$ (tanque de almacenamiento abierto a la atmósfera)

$p_2 = 0$ (tubería de descarga abierta a la atmósfera)

$v_1 = 0$ (velocidad despreciable en relación al área del tanque)

$$0 + 0 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + 0 + z_2 + \sum (hf + hm) - H_B$$

$$H_B = (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

La altura estática considerada es la diferencia de cotas tanto de la salida de agua como de la descarga. Los caudales considerados para determinar la curva del sistema son de 0.1 lt/s hasta 1.0 lt/s con incrementos de 0.1 lt/s.

En la conducción a construir se calculará y medirá la pérdida por fricción en tubería de PVC de 1" y pérdidas menores en accesorios de 1".

3.1.1.1 Pérdidas de energía por fricción (hfi)

Proceso empleado:

1. Subdividir por tramos la conducción según material y necesidad de valores de presión en puntos estratégicos.
2. Determinar longitudes de tramo y el diámetro interno a utilizar.
3. Encontrar la rugosidad absoluta del material y calcular la rugosidad relativa (ϵ/D_i).
4. Calcular el número de Reynolds teniendo en cuenta la viscosidad cinemática.
5. Utilizando el diagrama de Moody o utilizando la ecuación de P. K. Swamee y A. K. Jainse obtiene del coeficiente de fricción f .

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right)^2}$$

6. Con la ecuación de Darcy-Weisbach se procede a calcular la pérdida de fricción por tramos y la pérdida de fricción total.

TRAYECTORIA										
TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ε (mm)	ε/Di	f	hfi (m)
Succión – Bomba	PVC 1”	0,3	24,3	0,1	0,2156	4721	0,0015	6,1728E-05	0,03859	0,00113
Bomba – Descarga	PVC 1”	5,8	24,3	0,1	0,2156	4721	0,0015	6,1728E-05	0,03859	0,02183
								hf=		0,02296

Tabla 23. Pérdidas de fricción. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

7. Teniendo en cuenta la variación de caudales previamente anticipados se calcula las pérdidas de fricción hf para cada uno de ellos.

TRAYECTORIA						
Q (lts/s)	Ho (m)	V(m/s)	v ² /2g	Re	f	hf (m)
0	0,35	0	0	0	0	0
0,1		0,2156	0,0024	4721	0,03859	0,02296
0,2		0,4312	0,0095	9443	0,03157	0,07513
0,3		0,6469	0,0213	14164	0,02834	0,15170
0,4		0,8625	0,0379	18885	0,02634	0,25070
0,5		1,0781	0,0592	23606	0,02494	0,37090
0,6		1,2937	0,0853	28328	0,02388	0,51144
0,7		1,5094	0,1161	33049	0,02304	0,67166
0,8		1,7250	0,1517	37770	0,02235	0,85104
0,9		1,9406	0,1919	42491	0,02177	1,04915
1		2,1562	0,2370	47213	0,02128	1,26563

Tabla 24. Pérdidas por fricción variación de caudales. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.1.1.2 Pérdidas menores de energía (hm)

Proceso empleado:

1. Subdividir por tramos la conducción según material y diámetro.
2. Realizar un conteo de los accesorios a utilizar por tramo.
3. Determinar el diámetro interno de la tubería para cada accesorio.
4. Determinar la longitud equivalente en diámetro de tubería Le/Di para cada accesorio.
5. Encontrar la rugosidad absoluta del material y calcular la rugosidad relativa (ε/Di).
6. Establecer f_T mediante el diagrama de Moody o con la siguiente ecuación en turbulencia completa.

$$f = \frac{0.25}{\frac{\varepsilon}{\log\left(\frac{D}{3.71}\right)^2}}$$

7. Calcular el coeficiente de resistencia $K = f_T * \left(\frac{Le}{Di}\right)$
8. Calcular la pérdida por accesorio en función del caudal al cuadrado con $hm = K * \left(\frac{Q^2}{2 * g * A^2}\right)$
9. Calcular las pérdidas menores unitarias de cada accesorio.
10. Contabilizar el número de accesorios existentes para tener la pérdida menor de cada tipo de accesorio. Sumar todas las pérdidas para obtener la pérdida menor de energía total.

TRAYECTORIA											
TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	A(m^2)	Q(l/s)	Le/Di	ε/Di	Ft	K	hmi(m)	hm(m)
Bomba – Descarga	Válvula check	1	24,3	0,00046	0,1	100	1,89E-03	2,31E-02	2,31E+00	5,5E-03	0,00547
	Tee (flujo bilateral)	1	24,3	0,00046	0,1	60	6,17E-05	1,09E-02	6,57E-01	1,6E-03	0,00156
	Codo estándar a 90°	6	24,3	0,00046	0,1	30	6,17E-05	1,09E-02	3,28E-01	7,8E-04	0,00467
	Válvula de bola acero	2	24,3	0,00046	0,1	150	1,89E-03	2,31E-02	3,46E+00	8,2E-03	0,01640
	Codo estándar a 45°	8	24,3	0,00046	0,1	16	6,17E-05	1,09E-02	1,75E-01	4,2E-04	0,00332
	Tee (flujo directo)	9	24,3	0,00046	0,1	20	6,17E-05	1,09E-02	2,19E-01	5,2E-04	0,00467
									hm=		0,03608

Tabla 25. Pérdidas menores. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

11. Realizar el mismo procedimiento para el cálculo de pérdidas menores con los distintos caudales.

TRAYECTORIA					
Q (lts/s)	Ho (m)	V(m/s)	v ² /2g	Re	hm (m)
0	0,35	0	0	0	0,00000
0,1		0,2156	0,0024	4721	0,03608
0,2		0,4312	0,0095	9443	0,14432
0,3		0,6469	0,0213	14164	0,32471
0,4		0,8625	0,0379	18885	0,57726
0,5		1,0781	0,0592	23606	0,90197
0,6		1,2937	0,0853	28328	1,29884
0,7		1,5094	0,1161	33049	1,76787
0,8		1,7250	0,1517	37770	2,30905
0,9		1,9406	0,1919	42491	2,92239
1		2,1562	0,2370	47213	3,60789

Tabla 26. Pérdidas menores variación de caudales. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Cálculo de altura total de bombeo ($H_B = TDH$)

Se utiliza la expresión:

$$H_B = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + (z_2 - z_1) + \sum (hf + hm)$$

Se toma en cuenta que:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = P$$

$$z_2 - z_1 = H_o$$

Por lo tanto:

$$TDH = H_o + \cancel{P} + \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \sum (hf + hm)$$

P es cero debido a que no es necesario llegar al tanque de almacenamiento con una presión mayor a cero.

TRAYECTORIA								
Q (lts/s)	Ho (m)	V(m/s)	v ² /2g	Re	f	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0	0,35	0	0	0	0	0	0,00000	0,35
0,1		0,2156	0,0024	4721	0,03859	0,02296	0,03608	0,41
0,2		0,4312	0,0095	9443	0,03157	0,07513	0,14432	0,58
0,3		0,6469	0,0213	14164	0,02834	0,15170	0,32471	0,85
0,4		0,8625	0,0379	18885	0,02634	0,25070	0,57726	1,22
0,5		1,0781	0,0592	23606	0,02494	0,37090	0,90197	1,68
0,6		1,2937	0,0853	28328	0,02388	0,51144	1,29884	2,25
0,7		1,5094	0,1161	33049	0,02304	0,67166	1,76787	2,91
0,8		1,7250	0,1517	37770	0,02235	0,85104	2,30905	3,66
0,9		1,9406	0,1919	42491	0,02177	1,04915	2,92239	4,51
1		2,1562	0,2370	47213	0,02128	1,26563	3,60789	5,46

Tabla 27. Resumen pérdidas y TDH. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Con los datos obtenidos se procede a realizar la curva del sistema.

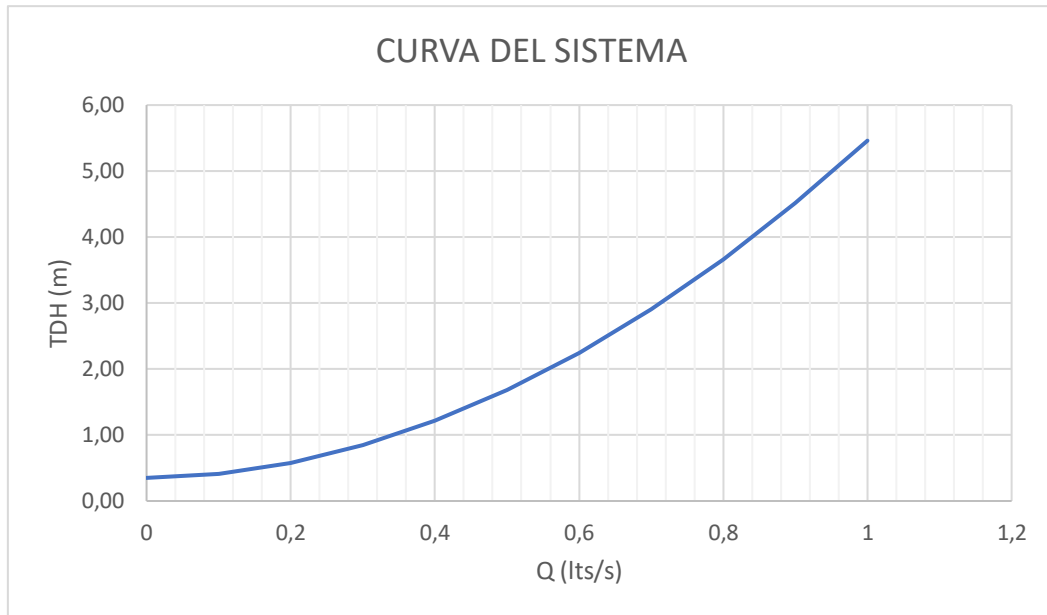


Figura 23. Curva del sistema. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.1.2 Selección de la bomba hidráulica

3.1.2.1 Potencia de la bomba

$$P_h = \gamma * Q * H$$

Donde,

P_h : potencia hidráulica (W)

γ : peso específico del agua (9807 N/m^3)

Q : caudal $\left(0.633 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

H : carga total para el caudal con el que se trabaja (3 m)

$$P_h = 9807 * 0.51 * 10^{-3} * 3 = 8.0525 \text{ W}$$

$$P_h = \frac{15.00471 \text{ W}}{745.7 \text{ W}} * hp = 0.0201 \text{ hp}$$

La bomba de menor potencia con la que se puede trabajar es con la de 0.5 hp

3.1.2.2 Curva de operación de la bomba

Para obtener la curva de altura piezométrica total (Hm) en función del caudal trasladado (Q) se utiliza la siguiente fórmula:

$$Hm = AQ^2 + BQ + C$$

Para obtener los coeficientes A, B y C se debe trabajar con tres puntos de la curva de altura (H) en función del caudal trasladado (Q) estos puntos se encuentran en los catálogos de las bombas.

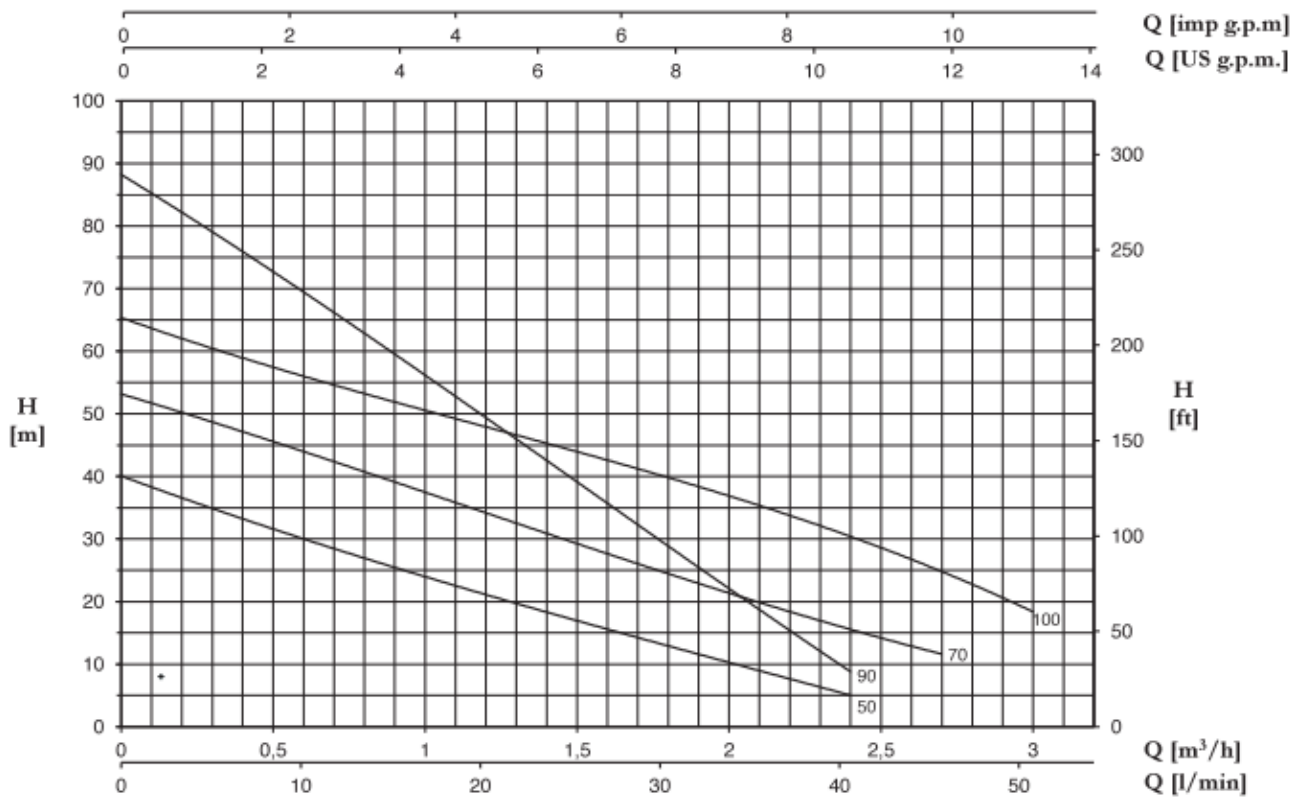


Figura 24. Catálogo bomba FORAS PE50F. Curva de la bomba. (Foras, 2017, pág. 19)

TYPE		P2		P1 (kW)		AMPERE		Q (m³/h - l/min)							
1~	3~	(HP)	(kW)	1~	3~	1~	3~	0	0,3	0,6	1,2	1,8	2,4	2,7	3
								0	5	10	20	30	40	45	50
						1x230 V 50 Hz	3x400 V 50 Hz	H (m)							
PE 50F	PE 50F T	0,5	0,37	0,5	0,5	2,3	1	40	35	30	21	13	5	-	-
PE 50BR	PE 50BR T	0,5	0,37	0,5	0,5	2,3	1	40	35	30	21	13	5	-	-
PE 50A	PE 50A T	0,5	0,37	0,5	0,5	2,3	1	40	35	30	21	13	5	-	-
PE 70	PE 70 T	0,7	0,5	0,9	0,9	4	1,7	53,1	48,8	44,1	33,8	24,7	15,5	11,6	-
PE 70A	PE 70A T	0,7	0,5	0,9	0,9	4	1,7	53,1	48,8	44,1	33,8	24,7	15,5	11,6	-
PE 100	PE 100 T	1	0,74	1,1	1,1	5,2	2	65	61	56	48	39	31	25,1	18
PE 100A	PE 100A T	1	0,74	1,1	1,1	5,2	2	65	61	56	48	39	31	25,1	18
PE 90	PE 90 T	1	0,74	1,2	1,1	5,6	2	88,2	79,2	69,3	49,5	28,8	8,8	-	-

Figura 25. Catálogo bomba FORAS PE50F. Datos curva de la bomba. (Foras, 2017, pág. 19)

Para realizar la fórmula de la curva de altura piezométrica total (Hm) en función del caudal trasladado (Q) se trabaja con los siguientes tres puntos:

Q (lts/s)	TDH (m)
0	40
0,33333333	21
0,66666667	5

Tabla 28. Puntos seleccionados para obtener los coeficientes A, B y C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Por lo tanto, la fórmula para la curva de operación de la bomba es la siguiente:

$$Hm = 13.5Q^2 - 6.15Q + 40$$

Q	Hm
0	40
0,1	33,985
0,2	28,24
0,3	22,765
0,4	17,56
0,5	12,625
0,6	7,96
0,7	3,565
0,8	-0,56
0,9	-4,415
1	-8

Tabla 29. Datos curva de operación de la bomba. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

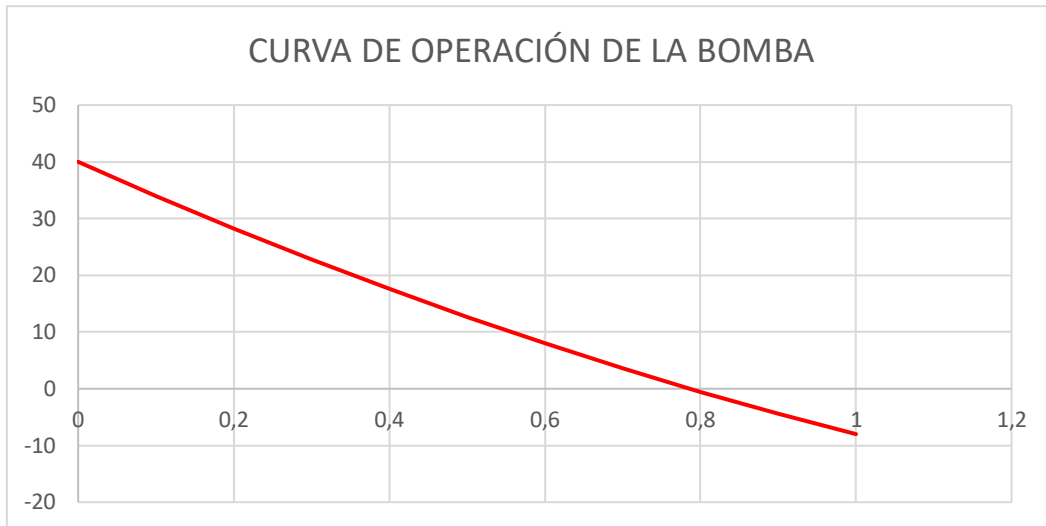


Figura 26. Curva de operación de la bomba (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.1.2.3 Punto de operación

El punto de operación es donde se cruza la curva del sistema con la curva de operación de la bomba, en este caso es $Q = 0.71$ l/s y $TDH = 3.00$ m.

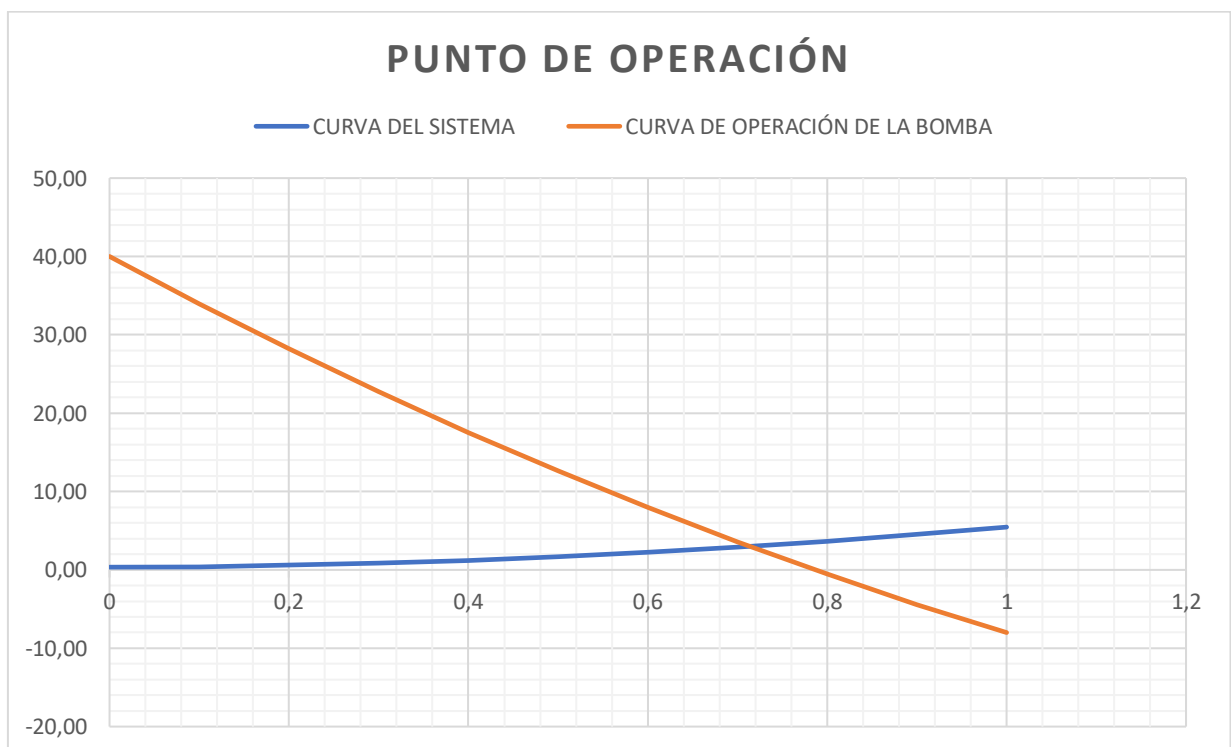


Figura 27. Punto de operación. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.1.2.4 Selección válvula de aire

3.1.2.4.1 Ubicación bolsas de aire

Se va a determinar el comportamiento del aire con caudales de 0.1 lt/s hasta 0.4 lt/s con incrementos de 0.1 lt/s en las cuatro pendientes que tiene el modelo hidráulico.

TRAMO CD				
Q(l/s)	Q (m3/s)	S descendente	Q2/gD5	Comportamiento del aire
0,1	0,0001	1,6667	0,12030942	Regresa a contraflujo
0,2	0,0002		0,48123767	Regresa a contraflujo
0,3	0,0003		1,08278476	Regresa a contraflujo
0,4	0,0004		1,92495068	En el sentido del flujo
TRAMO DE				
Q(l/s)	Q (m3/s)	S	Q2/gD5	Comportamiento del aire
0,1	0,0001	1,3333	0,12030942	Regresa a contraflujo
0,2	0,0002		0,48123767	Regresa a contraflujo
0,3	0,0003		1,08278476	Regresa a contraflujo
0,4	0,0004		1,92495068	En el sentido del flujo
TRAMO EF				
Q(l/s)	Q (m3/s)	S	Q2/gD5	Comportamiento del aire
0,1	0,0001	1,3333	0,12030942	Regresa a contraflujo
0,2	0,0002		0,48123767	Regresa a contraflujo
0,3	0,0003		1,08278476	Regresa a contraflujo
0,4	0,0004		1,92495068	En el sentido del flujo
TRAMO FG				
Q(l/s)	Q (m3/s)	S ascendente	Q2/gD5	Comportamiento del aire
0,1	0,0001	0,8571	0,12030942	Regresa a contraflujo
0,2	0,0002		0,48123767	Regresa a contraflujo
0,3	0,0003		1,08278476	En el sentido del flujo
0,4	0,0004		1,92495068	En el sentido del flujo

Tabla 30. Comportamiento de las burbujas de aire según la pendiente y el caudal. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.2 Planos de diseño

3.2.1 Dimensión del tablero

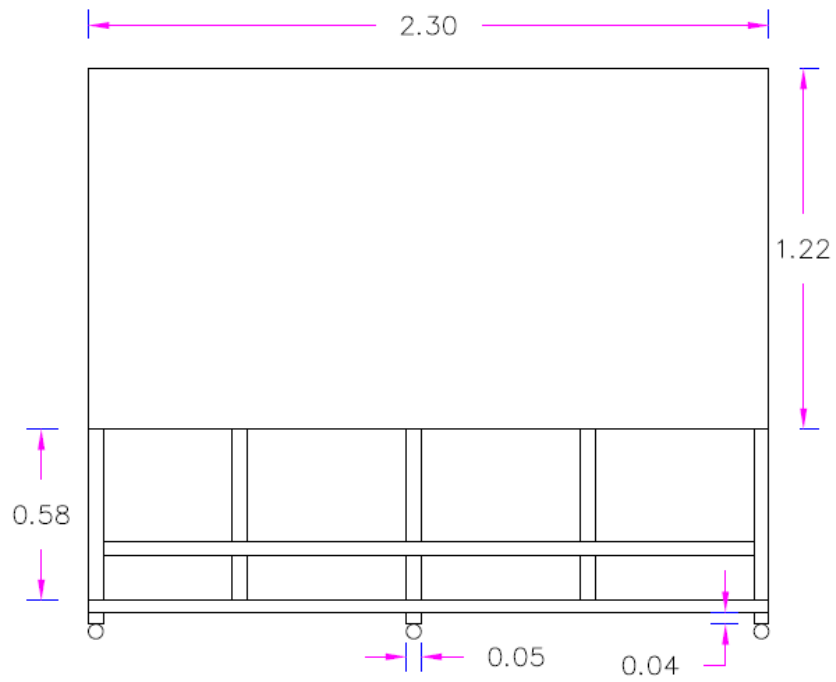


Figura 28. Vista frontal tablero. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

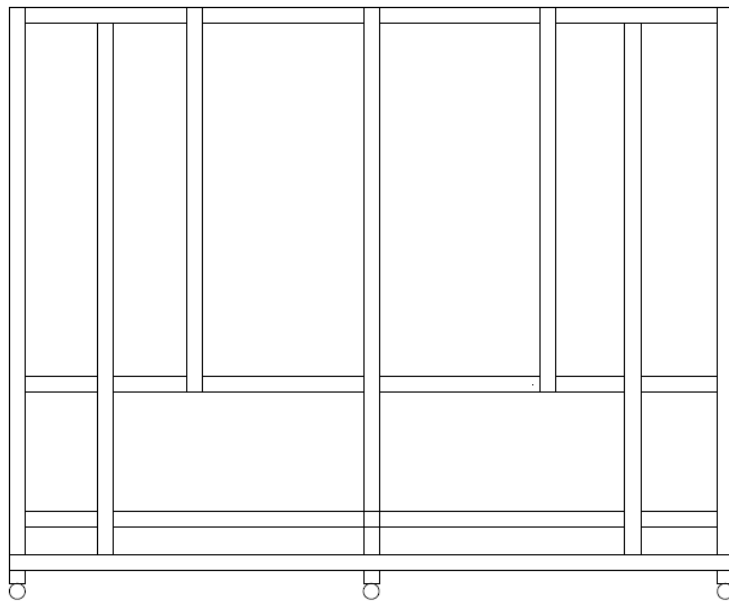


Figura 29. Vista posterior tablero. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

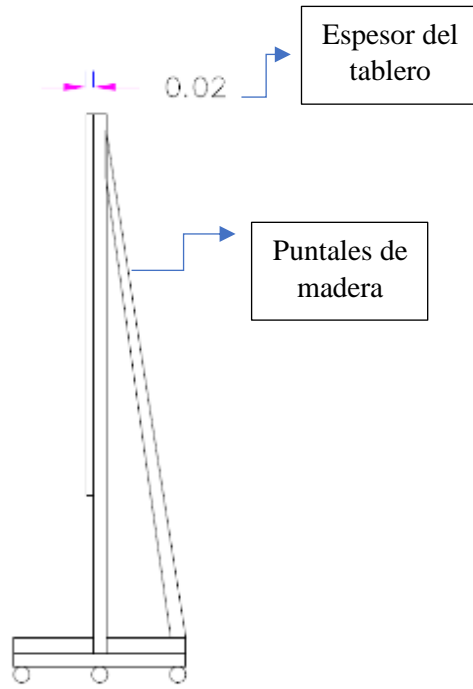


Figura 30. Vista lateral tablero. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.2.2 Dimensión de tuberías PVC 1" y mangueras 1"

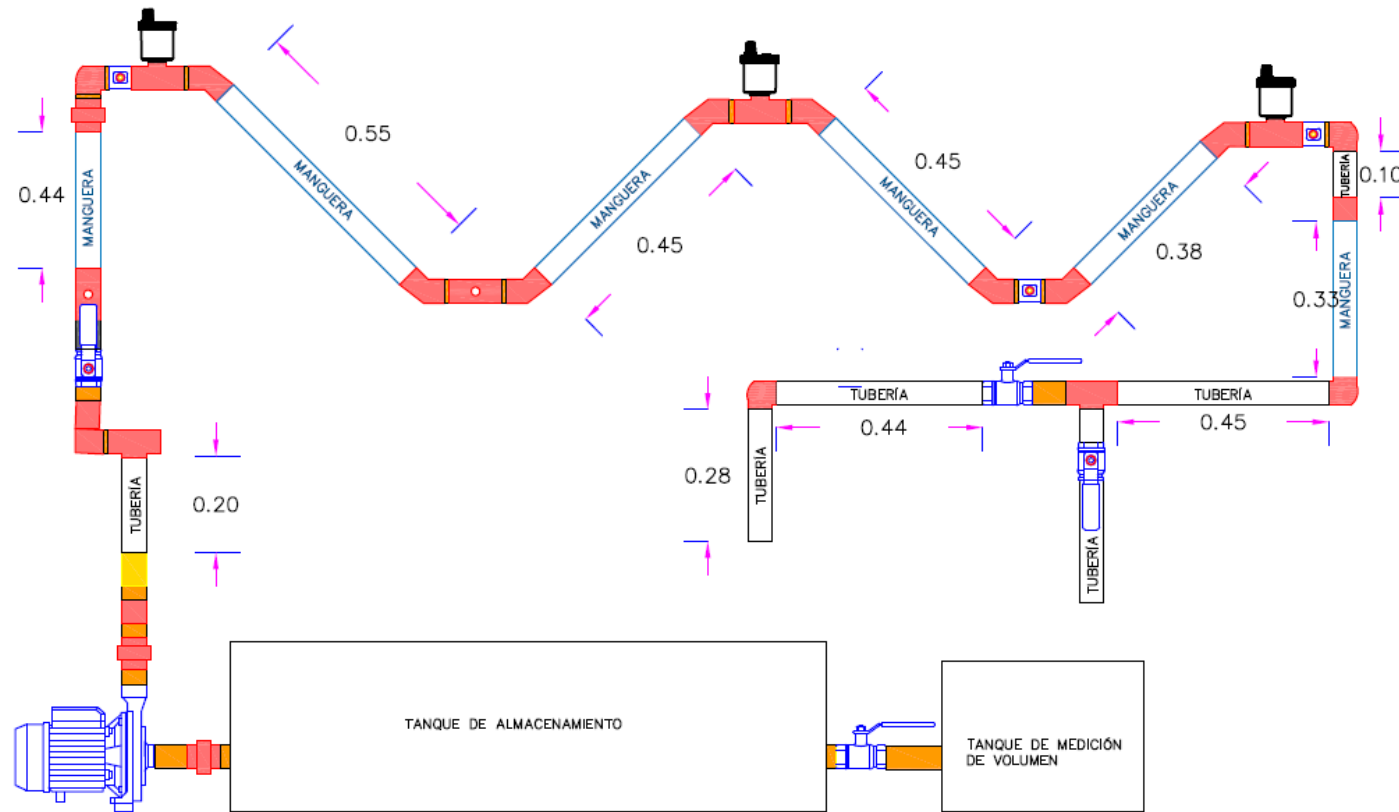


Figura 31. Dimensión de tuberías y mangueras. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.2.3 Plano de despiece: ubicación de accesorios

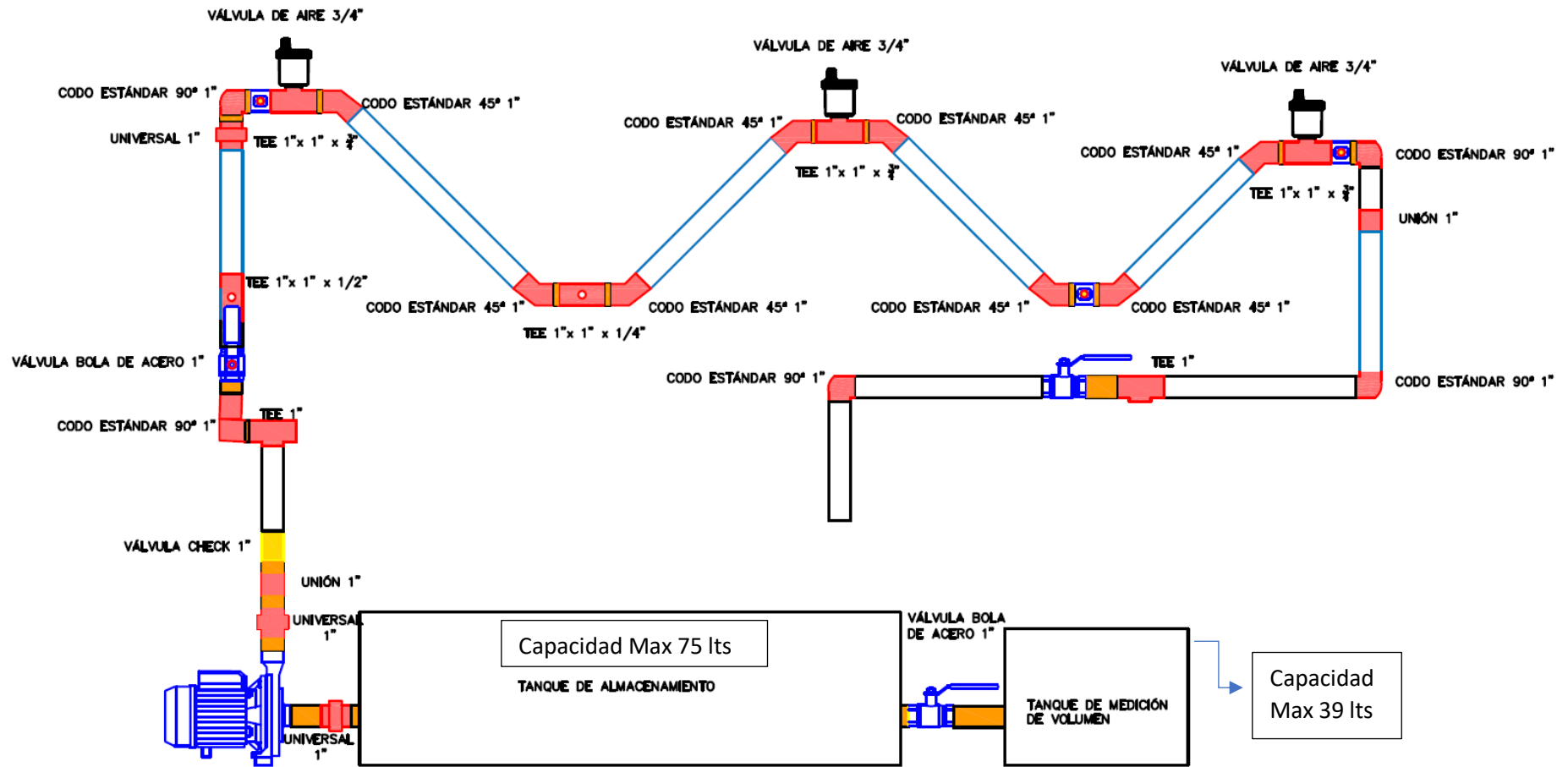


Figura 32. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.2.3.1 Lista de accesorios para trayectoria

ACCESORIOS	MATERIAL	∅ (pulg)	CANTIDAD
Universal	PVC roscable	1	3
Válvula check	Acero roscable	1	1
Tee (flujo directo)	PVC roscable	1 X 1 X 1/4	1
Tee (flujo directo)	PVC roscable	1 X 1 X 1/2	1
Tee (flujo directo)	PVC roscable	1 X 1 X 3/4	3
Tee (flujo bilateral)	PVC roscable	1	1
Tee (flujo directo)	PVC roscable	1	1
Unión	PVC roscable	1	1
Codo estándar a 90°	PVC roscable	1	6
Válvula de bola acero	Acero roscable	1/2	2
Válvula de bola acero	Acero roscable	1	5
Codo estándar a 45°	PVC roscable	1	8
Adaptador manguera	PVC	1	12
Válvula de aire	Acero roscable	3/4	3
Sensor de flujo	PVC roscable	1	1
ACCESORIOS ESPECIALES			
ACCESORIOS	MODELO	RANGO	CANTIDAD
Flujometro digital G1"	DFC15 - 100 – 240 VCA	1-60 l/min; ±1l/min	1
Sensor de temperatura	NTC3950	0-125°C, precisión: ±1°C	1

Tabla 31. Lista de accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3 Construcción del modelo

3.3.1 Construcción del tablero



Fotografía 1. Colocación de ruedas. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 2. Pintura y lacado del tablero. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.2 Conexión de bomba al sistema de tuberías y a tanques de almacenamiento.



Fotografía 3. Entrada de la bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 4. Orificios en los tanques para colocación de accesorios y tuberías. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 5. Unión tanques y bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 6. Unión tanques y bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 7. Unión tanques y bomba. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.3 Unión de tuberías, mangueras y accesorios



Fotografía 8. Bomba, tubería y accesorios. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 9. Tuberías y accesorios. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 10. Tuberías, mangueras y accesorios. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 11. Tuberías y accesorios, se incluyen grifos en los tanques. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.4 Colocación de caudalímetro digital



Fotografía 12. Sensor digital caudalímetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 13. Caudalímetro digital. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.5 Instalación de válvulas de aire



Fotografía 14. Válvulas de aire. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 15. Válvulas de aire. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

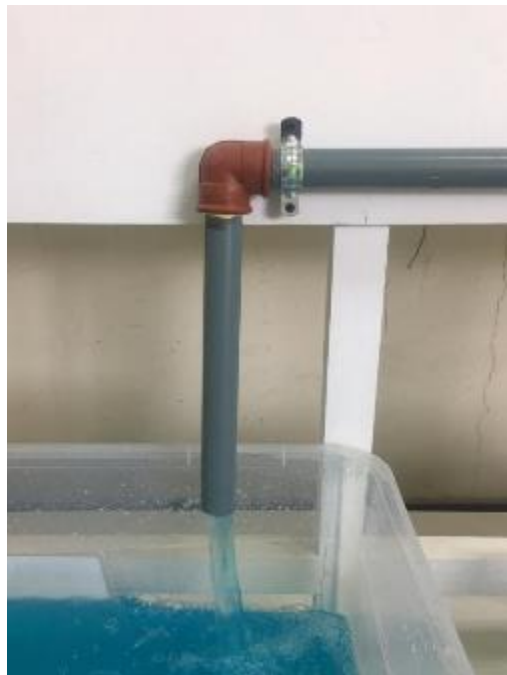


Fotografía 16. Válvulas de aire. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.6 Colocación de agarraderas



Fotografía 17. Agarraderas. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 18. Agarraderas. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.7 Colocación de collarines con acoples para piezómetros y manómetros



Fotografía 19. Collarines. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.8 Instalación de accesorios para realización de purga del sistema



Fotografía 20. Collarín purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.9 Unión de tuberías y accesorios para realización de purga del sistema

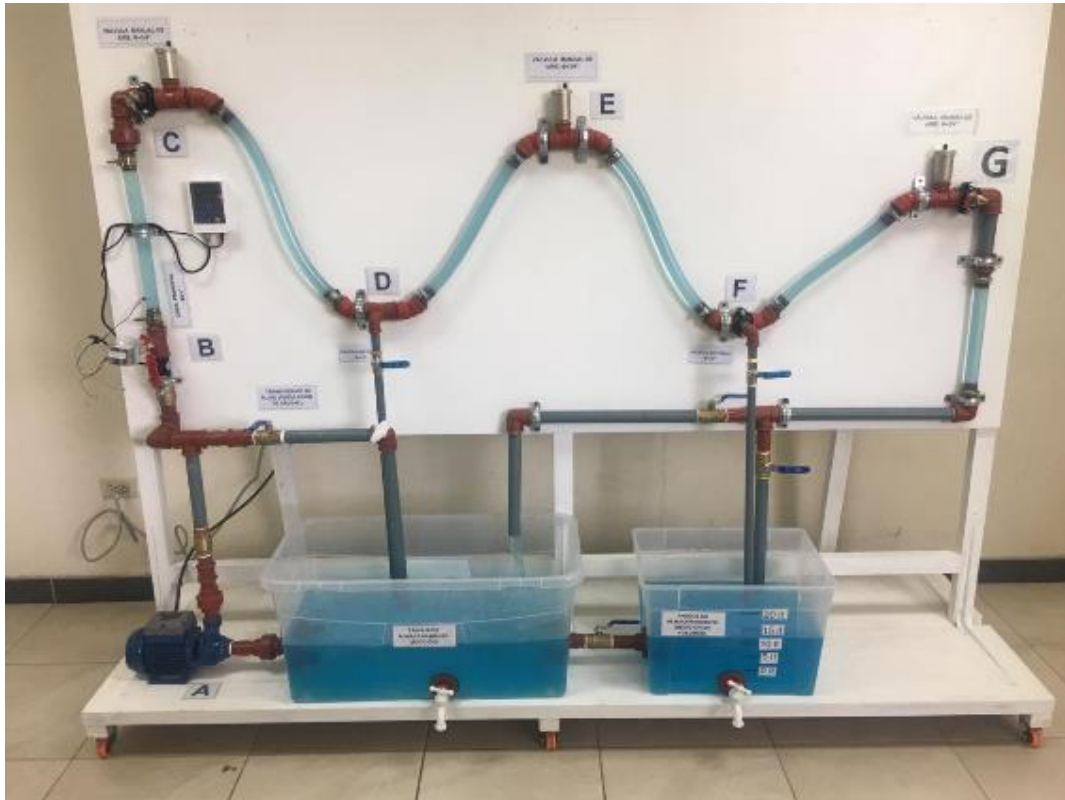


Fotografía 21. Tuberías y accesorios purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 22. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.3.10 Modelo hidráulico



Fotografía 23. Modelo hidráulico. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.4 Partes del modelo terminado

3.4.1 Bomba Foras PE50F, tubería de succión e impulsión 1"



Fotografía 24. Bomba Foras. Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.4.2 *Válvula Check vertical 1"*



Fotografía 25. Válvula Check. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.4.3 *Válvula de bola 1" (alivio)*



Fotografía 26. Válvula de bola (alivio). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.4.4 Válvula de bola 1" (línea principal)



Fotografía 27. Válvula de bola (línea principal). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.4.5 Mangueras 1" y Tubos PVC 1"



Fotografía 28. Mangueras y tubos PVC. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.4.6 Codos PVC 90° 1"



Fotografía 29. Codo estándar a 90°. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.4.7 Codos PVC 45° 1"



Fotografía 30. Codo estándar a 45°. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.5 Verificación del funcionamiento del modelo hidráulico

Para verificar el apego del modelo construido con lo calculado según las leyes de la hidráulica se comparará las presiones calculadas en los puntos B, C y G con las presiones marcadas en los dispositivos de medición de presión.

Tramo Succión-Bomba:

- Pérdidas por fricción:

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi (m)
SUCCIÓN-BOMBA	PVC 1"	0,15	24,3	0,51	1,0997	24078	0,0015	6,1728E-05	0,02482	0,00944

Tabla 32. Pérdidas por fricción tramo succión-bomba. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Presión:

PA/ γ				
Q	0,51	l/s		
V	1,10	m/s		
$Vb^2/2g$	0,06	m		
ΔH	0	m		
hf	0,00944	m		
hm	0,00000	m		
PRESIÓN	-0,07108	mca	-0,10096626	PSI

Tabla 33. Presión punto A. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Tramo A-B:

- Pérdidas por fricción:

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	F	hfi (m)
A-B	PVC 1"	0,5	24,3	0,51	1,0997	24078	0,0015	6,1728E-05	0,02482	0,03148

Tabla 34. Pérdidas por fricción tramo A-B. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

- Pérdidas menores:

TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ϵ/Di	Ft	K	hmu(m)	hmi (m)
A-B	Válvula check	1	24,3	0,51	1,0997	100	1,89E-03	2,31E-02	2,31E+00	1,4E-01	0,14217
	Codo estándar a 90°	2	24,3	0,51	1,0997	30	6,17E-05	1,09E-02	3,28E-01	2,0E-02	0,04048
	Válvula de bola acero	1	24,3	0,51	1,0997	150	1,89E-03	2,31E-02	3,46E+00	2,1E-01	0,21325
	Tee (flujo bilateral)	1	24,3	0,51	1,0997	60	6,17E-05	1,09E-02	6,57E-01	2,8E-02	0,02768
									hm=		0,42358

Tabla 35. Pérdidas menores tramo A-B. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

- Presión:

PB/γ				
Hbomba	3	mca	4,2614	PS1
Q	0,51	l/s		
V	1,10	m/s		
Vb²/2g	0,06	m		
ΔH	0,84	m		
hf	0,03148	m		
hm	0,42358	m		
PRESIÓN	1,57222	mca	2,233268686	PSI

Tabla 36. Presión punto B. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

Tramo B-C:

- Pérdidas por fricción:

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ε (mm)	ε/Di	f	hfi (m)
B-C	PVC 1"	0,64	24,3	0,51	1,0997	24078	0,0015	6,1728E-05	0,02482	0,04029

Tabla 37. Pérdidas por fricción tramo B-C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

- Pérdidas menores:

TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ε/Di	Ft	K	hmu(m)	hmi (m)
B-C	Codo estándar a 90°	1	24,3	0,51	1,0997	30	6,17E-05	1,09E-02	3,28E-01	2,0E-02	0,02024
	Tee (flujo directo)	1	24,3	0,51	1,0997	20	6,17E-05	1,09E-02	2,19E-01	9,2E-03	0,00923
									hm=		0,02947

Tabla 38. Pérdidas menores tramo B-C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

- Presión:

PC/γ				
Hbomba	3	mca	4,2614	PS1
Q	0,51	l/s		
V	1,10	m/s		
Vb²/2g	0,06	m		
ΔH	0,6	m		
hf	0,04029	m		
hm	0,02947	m		
PRESIÓN	0,69638	mca	0,989175192	PSI

Tabla 39. Presión punto C. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

Tramo C-G:

- Pérdidas por fricción:

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi (m)
C-G	PVC 1"	1,88	24,3	0,51	1,0997	24078	0,0015	6,1728E-05	2,4822E-02	0,11836

Tabla 40. Pérdidas por fricción tramo C-G. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

- Pérdidas menores:

TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ϵ/Di	fT	K	hmu(m)	hmi (m)
C-G	Codo estándar a 45°	8	24,3	0,51	1,0997	16	6,17E-05	1,09E-02	1,75E-01	7,4E-03	0,05906
	Tee (flujo directo)	6	24,3	0,51	1,0997	20	6,17E-05	1,09E-02	2,19E-01	9,2E-03	0,05536
									hm=		0,11442

Tabla 41. Pérdidas menores tramo B-F. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

- Presión:

PG/ γ				
Q	0,51	l/s		
V	1,10	m/s		
$Vb^2/2g$	0,06	m		
ΔH	-0,35	m		
hf	0,11836	m		
hm	0,11442	m		
PRESIÓN	0,05196	mca	0,073804581	PSI

Tabla 42. Presión punto G. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

Una vez calculada la presión en los distintos puntos se puede verificar utilizando los manómetros en los puntos B, C y G.

VERIFICACIÓN DE RESULTADOS		
PUNTO DE ESTUDIO	PRESIÓN DISEÑO [PSI]	PRESIÓN MEDIDA [PSI]
B	2.233	2.20
		2.175
		2.195
		2.20
		2.225
C	0.989	0.85
		0.83
		0.85
		0.84
		0.85
G	0.074	0
		0
		0
		0
		0

Tabla 43. Comparación de resultados de presión. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

Por lo visto en la tabla 43, se puede concluir que el diseño está realizado correctamente y cumpliendo con las leyes de la hidráulica. Las variaciones en las mediciones pueden darse por defecto de apreciación del dispositivo de medición y por la asunción realizada en el diseño de la longitud equivalente de los acoples que permiten unir el tubo pvc rígido con la manguera de pvc.

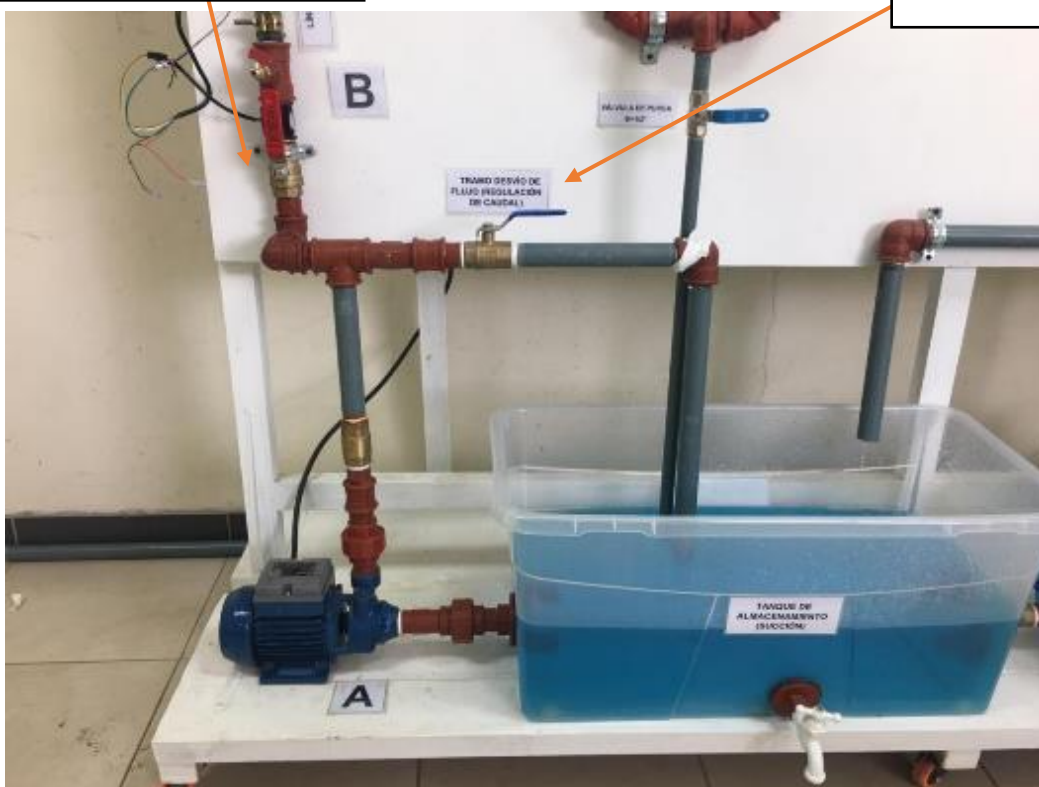
3.6 Manual de operación y mantenimiento del modelo hidráulico

3.6.1 Encendido del Equipo

- Para el encendido del equipo se debe verificar que tanto la válvula de bola principal como la ubicada en la línea de desvío de caudal estén abiertas totalmente. Dichas válvulas se encuentran inmediatamente después de la bomba. Las dos válvulas estarán completamente abiertas cuando la manija este alineada completamente al eje longitudinal de la tubería a la que están conectadas. De igual manera las válvulas se encuentran cerradas cuando la manija esta perpendicular al eje longitudinal de la tubería.

Válvula de bola de acero línea principal de conducción (abierta cuando se alinea a la tubería)

Válvula de bola de acero línea de alivio de caudal (abierta cuando se alinea a la tubería)



Fotografía 31. Válvulas control caudal de entrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Además, verificar que las dos válvulas de bola ubicadas en la zona de purga del sistema estén completamente cerradas para tener una línea de conducción con una sola salida de agua al final del tramo.

Válvulas de purga de acero (cerrada cuando su llave esta perpendicular a la tubería)

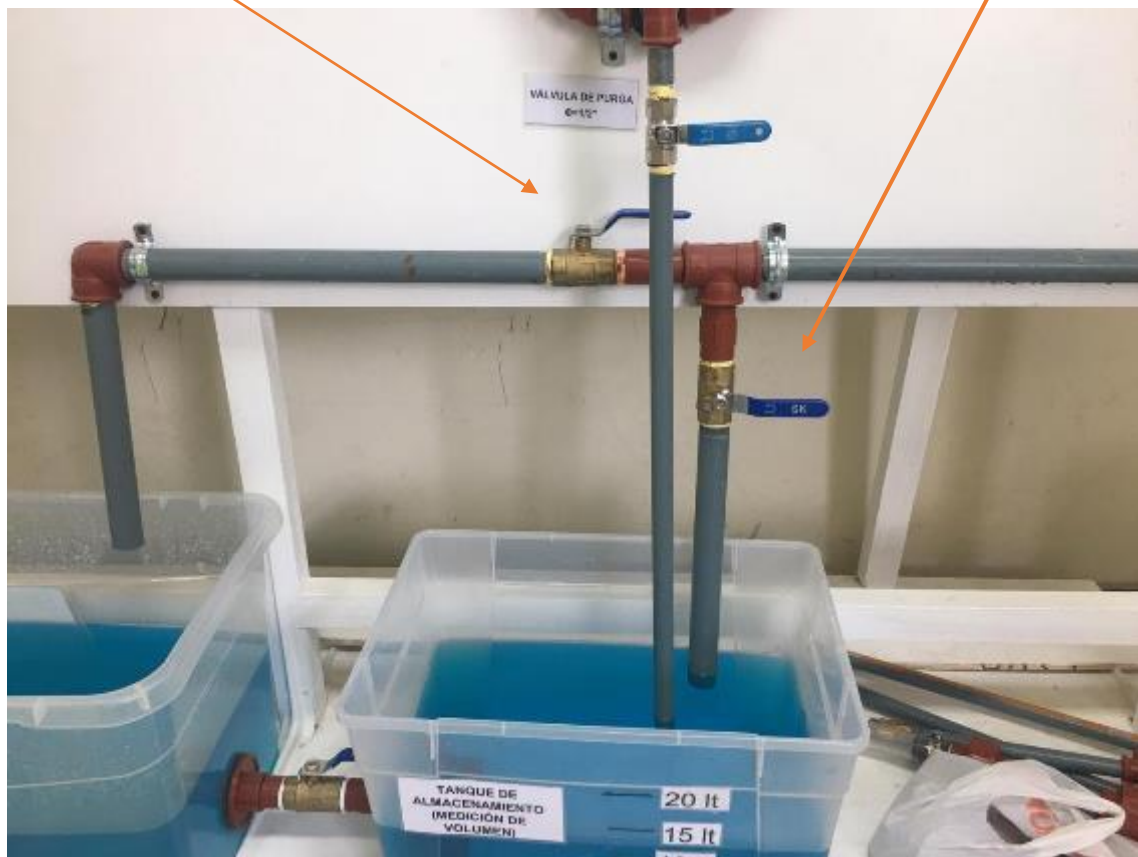


Fotografía 32. Válvulas de Purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- A continuación, verificar que la válvula de desfogue de agua del tanque principal esté abierta y la válvula de desfogue al tanque de medición de caudal esté cerrada completamente.

Válvula Tanque de Almacenamiento

Válvula Tanque de medición de volumen



Fotografía 33. Válvulas de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

NOTA: Estos procedimientos se los realiza para tener un flujo de agua constante sin bloqueos, evitando daños en el sistema de bombeo, previniendo daños en la bomba y el vaciado del tanque de succión, garantizando que la bomba succione únicamente agua.

- Verificar que las válvulas de aire estén taponadas previo al encendido.



Fotografía 34. Válvula de medición de presión. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Llenar el tanque principal de succión hasta la marca indicada en la pared frontal. Verificar que la válvula de bola de acero que interconecta los dos tanques esté cerrada para trabajar únicamente con el tanque principal.



Fotografía 35. Válvula de interconexión de tanques. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Cuando se haya verificado todos los puntos previamente mencionados, se procede a encender la regleta ubicada en la parte posterior del tablero para activar tanto la bomba como el flujómetro.



Fotografía 36. Botón de encendido del equipo. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.6.2 Control de caudal en la línea principal

- Al momento del encendido del equipo se debe manipular la válvula de bola de acero de la línea de desvío, cerrándola gradualmente de manera progresiva para tener el caudal requerido para el análisis de la formación de aire dentro de una tubería. Si se requiere caudal máximo en la línea principal cerrar completamente la válvula del desvío de caudal.
- La línea de desvío de caudal permite redirigir el caudal al tanque principal para poder controlar la velocidad de llenado del sistema y el caudal influyente en la línea principal.



Fotografía 37. Válvula de regulación de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.7 Medición de Presiones

En el equipo de laboratorio existen dos puntos de toma de presión a lo largo de la línea principal de conducción de agua. Dependiendo del caudal utilizado, es decir, de la apertura de la válvula de bola aliviadora de caudal, se debe considerar el equipo y la manera de realizar la medición de presión para encontrar las pérdidas de energía en dicho tramo:

- Para la medición de presión con piezómetros tubulares de agua, se debe tener completamente abierta la válvula de alivio de caudal en el desvío justo después de la bomba, esto permitirá que el sistema libere presión y evita la fuga de agua por la superficie de los tubos.



Fotografía 38. Válvula de medición de presión. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Es necesario retirar el aire que está en los piezómetros tubulares de agua, para esto se abre por completo la válvula que permite el paso de agua a la línea principal mientras se mantiene totalmente cerrada la válvula de alivio de caudal. Se debe conectar la unión del piezómetro al punto de medición y se abre las válvulas rojas pequeñas que permiten el paso de agua al piezómetro hasta que salga el aire atrapado en los piezómetros. Se debe realizar esto por un instante hasta que salga el aire y antes de que el agua salga expulsada por arriba de los tubos.
- Abrir la válvula gradualmente hasta observar que el nivel de agua en los piezómetros se encuentra entre el rango de medición.



Manipular la válvula gradualmente hasta poder observar que los piezómetros marcan el nivel de agua dentro del rango de medición.

Fotografía 39. Válvula de regulación de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



La válvula de paso
línea principal
debe estar
totalmente abierta

Fotografía 40. Válvula de paso línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Es un método de medida de presiones bajas, dado que si se quiere medir más presión el agua va a salir expulsada por la parte superior del tubo.
- Por otro lado, para medir presiones mayores se recomienda el uso del manómetro. Para ello, es necesario cerrar totalmente la válvula de alivio de caudal en el desvío inmediatamente después de la bomba y abrir la válvula que permite el flujo a la línea principal.



Fotografía 41. Conexión del manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 42. Válvula de regulación de caudal y línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

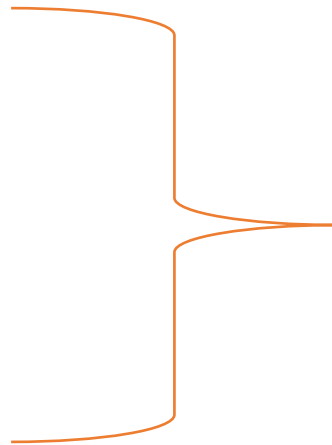
- Independientemente del equipo de medición de presión a utilizar se debe verificar que las válvulas pequeñas rojas estén cerradas para conectar los equipos en los puntos de medición. De igual manera, se debe verificar que el equipo este correctamente conectado, esto se logra al escuchar un click en el seguro interno de la unión.



Fotografía 43. Válvula medición de presión cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Válvula roja siempre cerrada. (únicamente abrirla al medir la presión en el punto siempre y cuando esté conectado el equipo de medición.)

- Los equipos de medición (manómetros y piezómetros) marcan la presión en cada punto de medición, mas no proporcionan la pérdida de energía existente, por lo que es necesario calcularla. Para saber realmente cuánta energía se disipa en fricción y por accesorios se debe restar la presión marcada entre los puntos de medición.
- Para los piezómetros de agua se toma la diferencia de alturas marcadas en los dos tubos de medición. En los manómetros únicamente se debe restar la primera lectura de la segunda y las unidades son en PSI. (1PSI = 0.704 mca.).
- Las lecturas de datos de los tubos permiten ver la diferencia en mca de presión entre el punto B y F, mas no indican la presión exacta en cada punto.



Los piezómetros de agua sirven únicamente para encontrar la diferencia de altura mas no la presión en cada punto medido.

Fotografía 44. Piezómetros tubulares de agua. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Indican presión en el punto de medición. Además, se puede restar las presiones para saber la pérdida existente en el tramo por fricción y por accesorios.

Fotografía 45. Medición con manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

3.8. Medición de Caudal

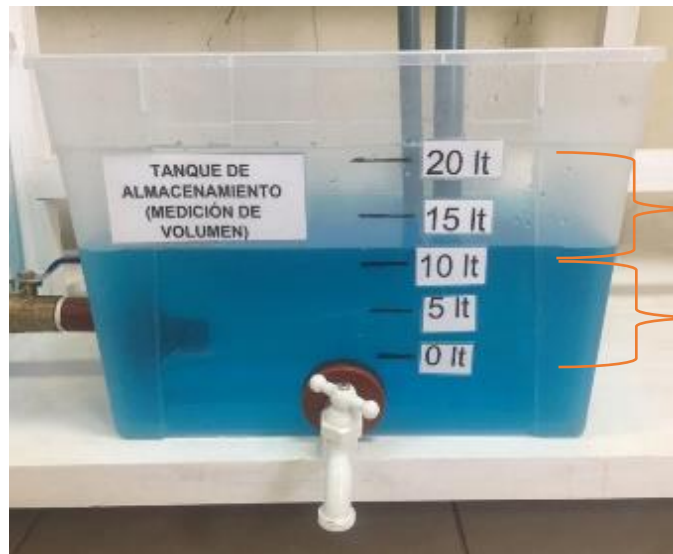
- Una vez tomadas las presiones se cierra las válvulas pequeñas rojas y se desconecta los equipos de medición. Si no se cierran dichas válvulas y se quita el equipo de medición con la bomba prendida, saldrá un chorro a presión por el punto de medición pudiendo provocar lesiones.
- No es necesario medir el caudal dado que la línea principal tiene un sensor de flujo incorporado el cual envía datos en vivo a una computadora instalada bajo el punto C. La misma indica el caudal, la temperatura y el conteo total de volumen de agua transportado.

Proceso secundario de medición de caudal en casos de avería en el caudalímetro digital:

- De igual manera, es posible medir el caudal mediante el conteo de tiempo de llenado del tanque de medición de volumen (5 lt o 10 lt), y realizando el cálculo respectivo para obtener la unidad de caudal lt/s.
- Cerrar la válvula que interconecta los dos tanques para impedir el paso de agua al tanque principal. Verificar que el nivel de agua del tanque este marcando 0 al momento de iniciar la medición. Cabe recalcar que los 0 lt son considerados al momento en que el agua cubre por completo la boquilla de succión de este.



Fotografía 46. Válvula de interconexión de tanques cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

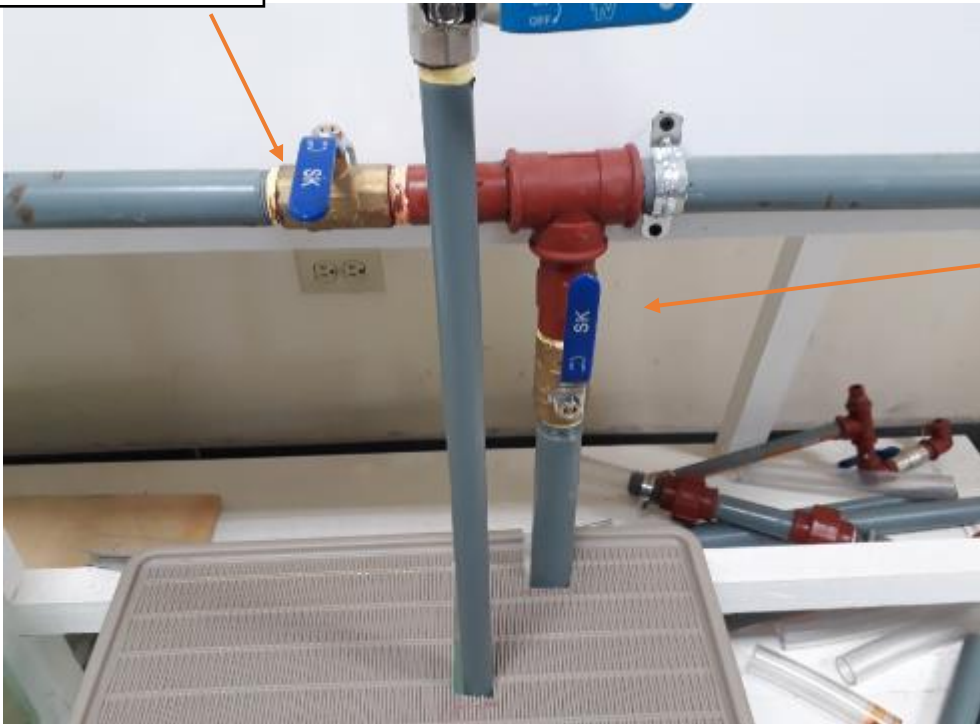


Rangos de medición de volumen (10 lt)

Fotografía 47. Tanque de almacenamiento (medición de volumen). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Cerrar la válvula que permite la expulsión de agua en el tanque principal y abrir la válvula que permite la expulsión de agua al tanque de medición de volumen.

Válvula tanque principal (cerrada)



Válvula tanque de medición de volumen (abierta durante la medición)

Fotografía 48. Posición de válvulas de salida. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Tomar el tiempo que toma en llenar el tanque desde que el agua empieza a caer en el tanque secundario hasta que el nivel de agua llegue a marcar 10 lt, o hasta que el nivel de agua suba 10 lt desde que inicio el cronómetro.
- Una vez tomado el tiempo cerrar la válvula de paso del tanque secundario y abrir la válvula que permite expulsar el agua al tanque principal de succión. Además, abrir la válvula que interconecta los dos tanques.

ADVERTENCIA: Es indispensable evitar que el tanque principal se vacíe para no dañar el sistema de bombeo.

- Cuando los niveles de los dos tanques se igualen se cierra nuevamente la válvula que los interconecta y se vacía el tanque secundario con la llave de expulsión que tiene en su frente.
- Definido el flujo volumétrico como $Q = V/t$, entonces se debe dividir el volumen llenado de 10 lt para el tiempo (s) que tomó en llenarse y se obtendrá el caudal en lt/s.

NOTA: Este cálculo es un proceso secundario emergente en caso de daños en el flujómetro digital. Caso contrario leer los datos de caudal, temperatura y volumen de agua en la pantalla digital de la computadora ubicada en la frontal del tablero.

3.9. Apagado del Equipo y purga del sistema

- Apagar la regleta ubicada en la parte posterior del tablero para apagar la bomba y el caudalímetro digital. Abrir las dos válvulas celestes de purga ubicadas en los puntos bajos del recorrido. Tener en cuenta que si se quiere sacar toda el agua del sistema se requiere mantener abierta la válvula del tanque principal y las dos válvulas celestes previamente mencionadas.
- Se puede purgar el sistema con las tres válvulas o con las deseadas, pero si no se usan las tres se tendrá restos de agua en el sistema principal.
- Es recomendable mantener abierta la válvula ubicada en el tramo de alivio de caudal para el vaciado de tuberías.
- No cerrar la válvula roja de paso inmediatamente después de la bomba para que la bomba siempre este con agua al volver a prender el equipo.

3.10.Limpieza del Equipo

- La limpieza del equipo requiere que la bomba este apagada y las tuberías sin agua. Se procede a retirar el agua de los tanques manualmente o bien con la llave de vaciado de cada tanque. Se cambia de agua y se agrega el colorante para poder observar de mejor manera lo acontecido.

3.11.Solución de Problemas Frecuentes

- Si la bomba no enciende, desconectarla y verificar si la misma está llena de agua. Para esto, aflojar el tornillo azul alado de la salida de agua de la misma. Si el problema persiste, abrir la tapa de la bomba y girar el tubo gris con los tanques vacíos. Si no funciona ningún método acudir al técnico más cercano.
- Si se traba el acople de cualquier manómetro o de las mangueras de medición de presión, mover para adelante y atrás repetidas veces el cilindro del acople.

- Si se percibe fugas en el sistema (línea principal, línea de desvío de caudal, tanques y accesorios) apagar inmediatamente el equipo y no volverlo a utilizar hasta reparar el daño.

3.12. Recomendaciones

- Cambiar regular y periódicamente el agua de los tanques del equipo para evitar daños en la bomba o corrosión de tubería por partículas suspendidas en el agua.
- Utilizar el equipo regularmente al menos una vez a la semana para evitar que el rotor de la bomba se detenga.
- Para tener datos comparables al diseño, sacar el agua de los piezómetros de agua previo a la toma de datos.
- No forzar los acoples de los equipos de medición, manejarlos con cuidado tanto al conectarlos como al desconectarlos. Antes de desconectar el acople verificar que la válvula roja pequeña este completamente cerrada para evitar fugas de agua por el orificio a presión.
- Manipular el acople del equipo de medición previo a su uso para evitar que se traben.

CAPÍTULO 4: PRÁCTICAS DE LABORATORIO

4.1 Selección de los ensayos a realizar

SELECCIÓN DE ENSAYOS	
# PRÁCTICA	TEMA
1	MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE FRICCIÓN EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS
2	PURGA DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN DE AGUA A PRESIÓN
3	EFFECTOS EN LA PRESIÓN, POTENCIA Y ENERGÍA DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN CON Y SIN EL ACCIONAR DE VÁLVULAS DE AIRE
4	LLENADO DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN CON EL ACCIONAR Y SIN EL ACCIONAR DE LAS VÁLVULAS DE AIRE INSTALADAS

Tabla 44. Selección de ensayos. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez).

4.2 Guía de laboratorio

4.2.1 PRÁCTICA 1

MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA DE FRICCIÓN EN TUBERÍA Y POR ACCESORIOS

RESUMEN

Se determina la pérdida que existe en las tuberías debido a la fricción del agua con el material de la tubería y al paso del flujo por los accesorios de la línea principal de conducción de agua.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

- Determinar la pérdida de energía en el tramo B-G con las válvulas de aire cerradas y a máximo caudal.

1.2. Objetivos Específicos

- Calcular el factor de fricción para la tubería y utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach, determinar pérdidas de fricción teóricas.
- Con la longitud equivalente en diámetros de tubería, por cada accesorio del tramo, determinar pérdidas por accesorios teóricas.
- Calcular la pérdida de energía total teórica y compararla con lo que indican los equipos de medición.

2. MARCO TEÓRICO

Pérdidas de carga por fricción

Las pérdidas de carga o energía son la suma de todos los términos que representan formas de energía no utilizables. Las pérdidas por fricción son causadas por un aumento de temperatura, transferencia de calor debido a la viscosidad o fricción entre las superficies de contacto. (Potter, Wiggert, & Ramadan, Mecánica de fluidos, 2015, pág. 111)

Para poder determinar las pérdidas de energía por fricción, se debe conocer la característica del flujo calculando el número de Reynolds.

$$R_e = \frac{VD\rho}{\mu}$$
$$v = \frac{\mu}{\rho}$$
$$R_e = \frac{D * V}{v}$$

Donde,

R_e : número de Reynolds adimensional

D : diámetro interno de la tubería

V : velocidad del flujo de agua

v : viscosidad cinemática

μ : viscosidad dinámica

ρ : densidad

“Cuando el número de Reynolds no excede de 2000 el flujo es laminar, si el resultado está entre 2000 y 4000 el flujo se encuentra en un estado de transición y si supera los 4000 el flujo es turbulento” (White, 2016, pág. 22).

Flujo laminar

Usar la relación de Hagen-Poiseuille para determinar la pérdida de energía.

$$h_f = \frac{32\mu LV}{\gamma D^2}$$

Donde,

h_f : pérdida de energía

μ : viscosidad dinámica

L : longitud de la tubería

D : diámetro de la tubería

γ : peso específico del fluido

V : velocidad

Flujo turbulento

Usar la fórmula de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = f \frac{L Q^2}{D 2gA^2}$$

Donde,

L: longitud de la tubería.

D: diámetro

V: velocidad

Q: caudal

A: área

f: factor de fricción

Para determinar el factor de fricción tener en cuenta la rugosidad absoluta de los materiales y relacionarlas para el diámetro de tubería.

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición esfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Tabla 45. Rugosidad absoluta de materiales. (Guarín R. & Flores G., 2013)

Fórmulas factor fricción:

- Para flujo laminar en todas las tuberías y cualquier fluido, se tiene:

$$f = 64/Re$$

- -En el caso de flujo turbulento se tienen los siguientes (Giles & Evett, Mecánica de los fluidos e hidráulica, 2003):

TIPO DE TUBERÍA	ECUACIÓN PARA f
Rugosas o lisas	$f = 8\tau_o/\rho V^2$
Tuberías lisas (Blasius ha sugerido con número de Reynolds ente 3.000 y 100.000)	$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$
Tuberías lisas (Ecuación de von Karman modificada por Prandtl para valores de Re hasta 3.000)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0.8$
Tuberías rugosas	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(r_o/\varepsilon) + 1.74$
Todas las tuberías (Colebrook)	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7 d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right]$

Tabla 46. Factor de fricción flujo turbulento. (Giles & Evett, *Mecánica de los fluidos e hidráulica*, 2003)

La ecuación de P. K. Swamee y A. K. Jainse sirve de igual manera para obtener el coeficiente de fricción f .

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2}$$

“En la zona de turbulencia completa el número de Reynolds no tiene ningún efecto por lo tanto el factor de fricción en esta zona es” (Chulluncuy Centeno & Diaz Vivanco, 2019):

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 D} \right) \right)^2}$$

Pérdidas de carga por accesorios

Las pérdidas menores o locales se presentan por interrupciones locales que pueden ocurrir a lo largo de la tubería o por cambios de geometría. Estas pérdidas locales se presentan debido a los accesorios del sistema como lo son las válvulas, codos, entre otros. (Potter, Wiggert, & Ramadan, *Mecánica de fluidos*, 2015, pág. 545)

Fórmula:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Donde,

K_L : coeficiente pérdida menor

V : velocidad

g : gravedad

$$K_L = \left(\frac{Le}{Di} \right) * f_T$$

Donde,

Le : longitud equivalente

Di : diámetro interno de la tubería

f_T : factor de fricción en la zona de turbulencia completa

Los valores de $\left(\frac{Le}{Di} \right)$ se presentan en la tabla a continuación.

TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, L_e/D

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doble de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

Tabla 47. Longitud equivalente en diámetros de tubería (Le/Di). (Mott, 2006, pág. 242)

3. MATERIALES Y EQUIPOS

Tablero de tuberías y accesorios

Para la práctica se utilizará el tramo de análisis de medición de presión (A-G)



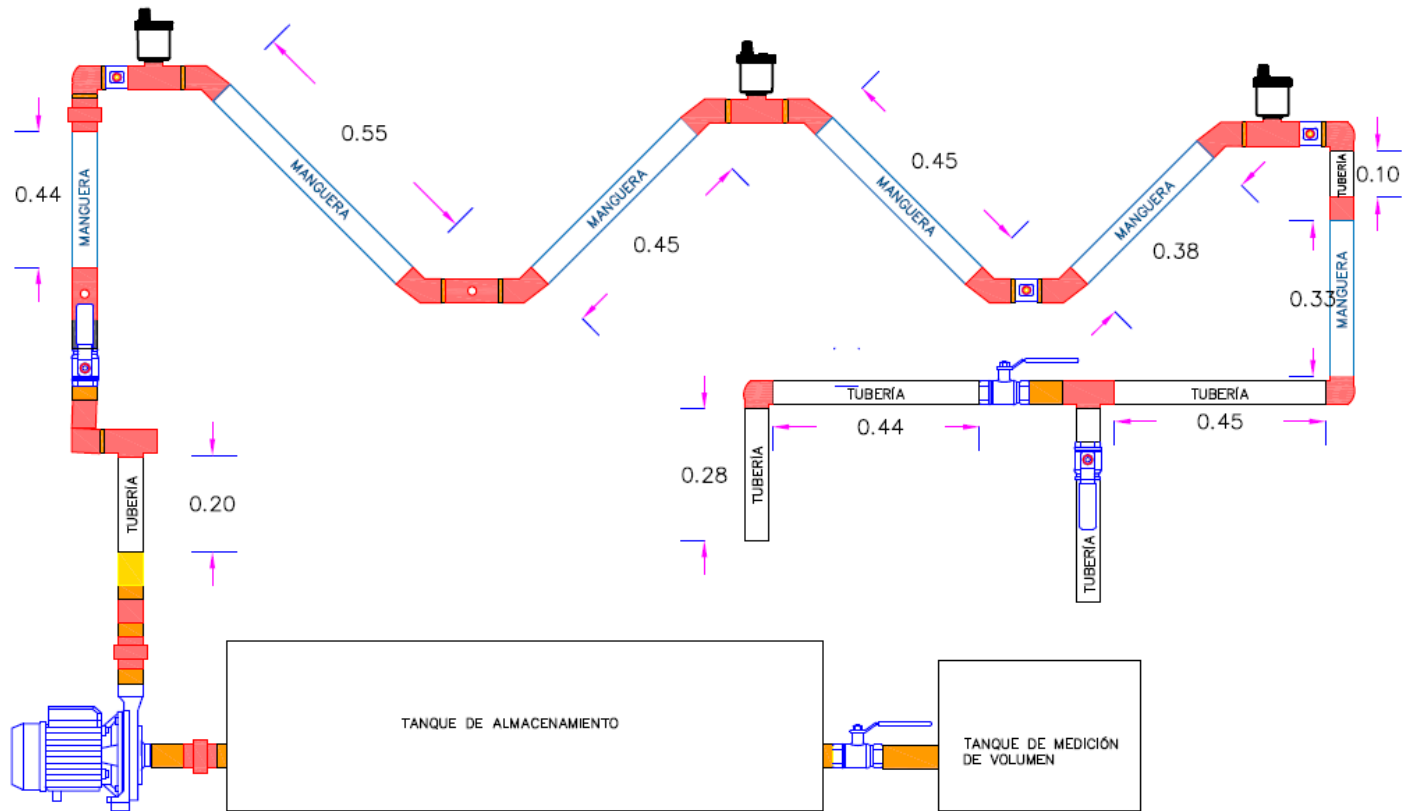
Fotografía 49. Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Manómetro



Fotografía 50. Manómetros. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

A continuación, se presenta el esquema del tablero con medidas e identificación de accesorios:



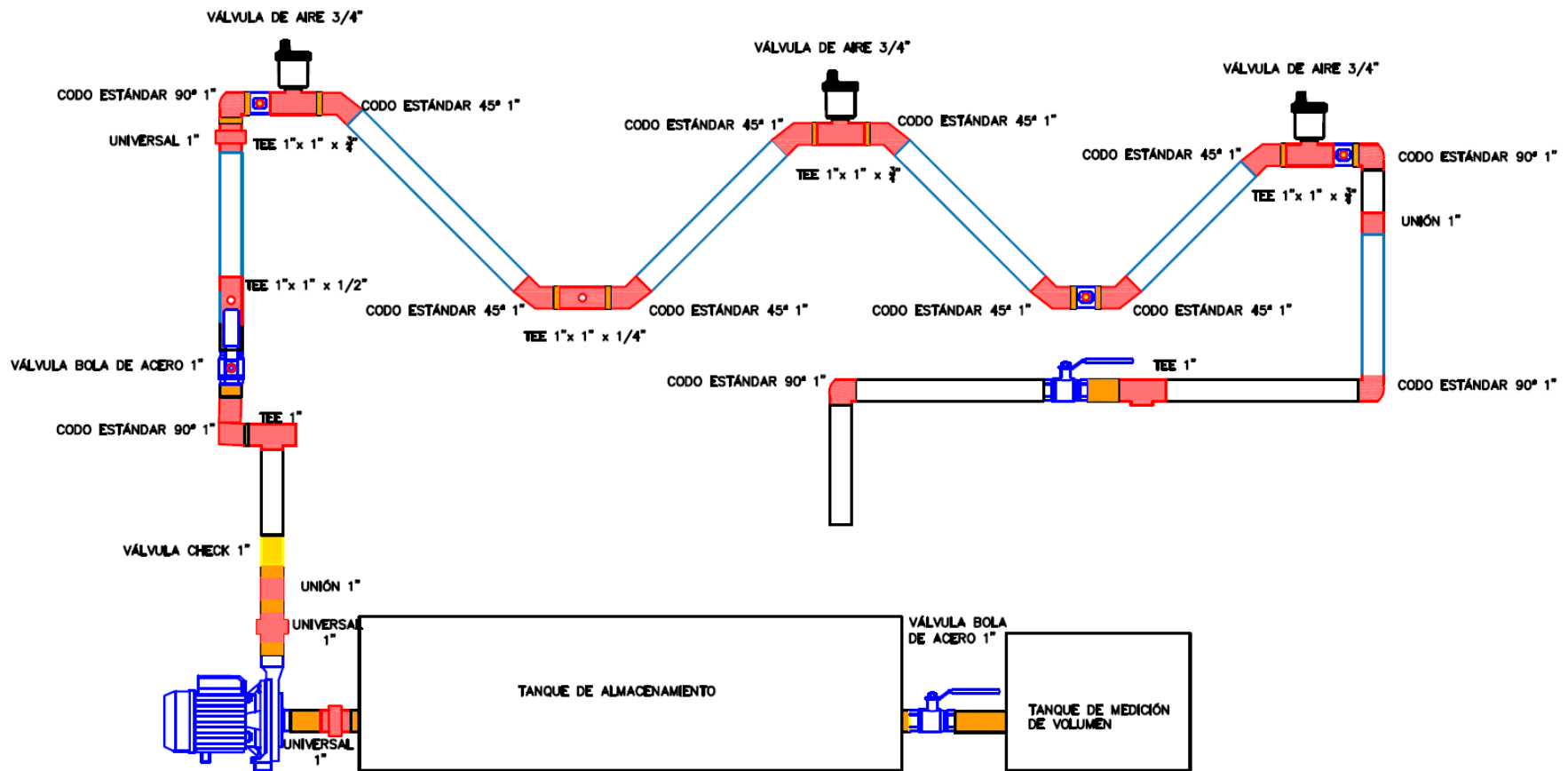
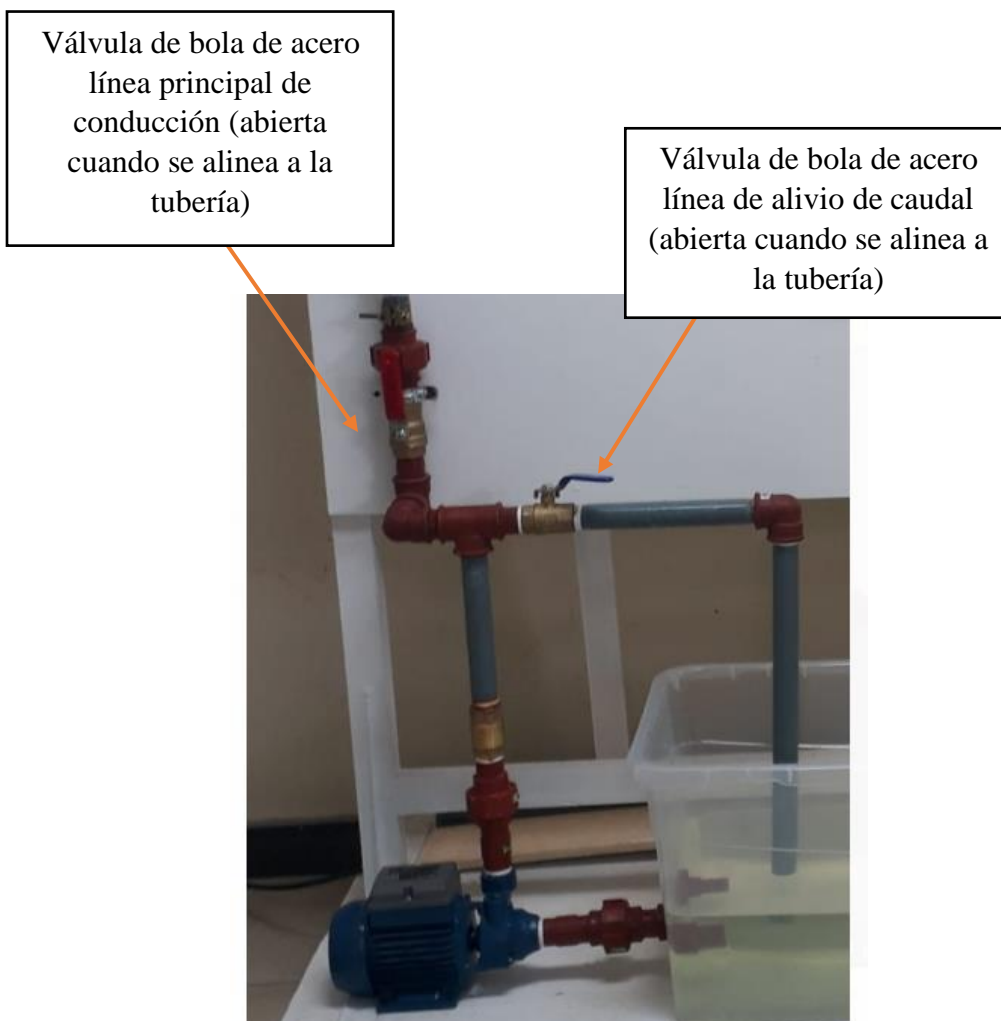


Figura 33. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

4. INSTRUCCIONES

4.1. Encendido del Equipo

- Para el encendido del equipo se debe verificar que tanto la válvula de bola principal como la ubicada en la línea de desvío de caudal estén abiertas totalmente. Dichas válvulas se encuentran inmediatamente después de la bomba. Las dos válvulas estarán completamente abiertas cuando la manija este alineada completamente al eje longitudinal de la tubería a la que están conectadas. De igual manera las válvulas se encuentran cerradas cuando la manija esta perpendicular al eje longitudinal de la tubería.



Fotografía 51. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

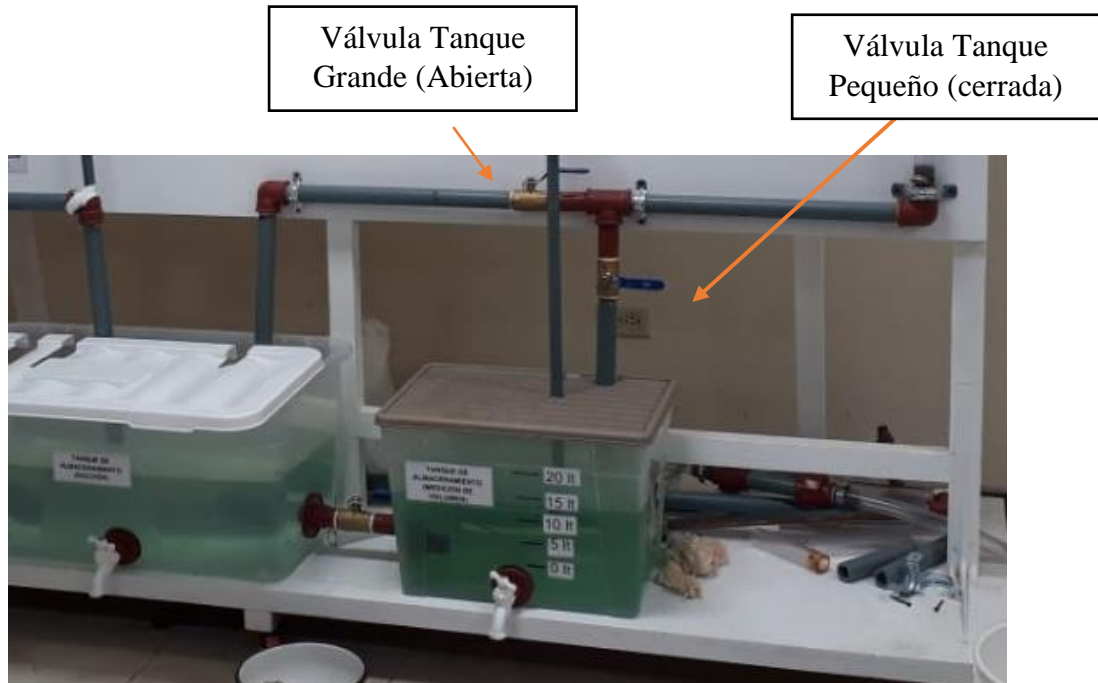
- De igual manera verificar que las dos válvulas de bola ubicadas en la zona de purga del sistema estén completamente cerradas para tener una línea de conducción con una sola salida de agua al final del tramo.

Válvulas de purga de acero (abierta cuando se alinea a la tubería)



Fotografía 52. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- A continuación, verificar que la válvula de desfogue de agua del tanque principal esté abierta y la válvula de desfogue al tanque de medición de caudal esté cerrada completamente.



Fotografía 53. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Nota: Estos procedimientos se los realiza para tener un flujo de agua constante sin bloqueos, evitando daños en el sistema de bombeo, previniendo la explosión de la bomba y el vaciado del tanque de succión, garantizando que la bomba succione únicamente agua.

5. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

5.1. Actividades preparatorias

- Verificar que las válvulas de aire estén taponadas previo al encendido.
- Llenar el tanque principal de succión hasta la marca indicada en la pared frontal. Verificar que la válvula de bola de acero que interconecta los dos tanques esté cerrada para trabajar únicamente con el tanque principal.
- Cuando se haya verificado todos los puntos previamente dictados, se procede a encender la regleta ubicada en la parte posterior del tablero para activar tanto la bomba como el flujómetro.
- Al momento del encendido del equipo se debe manipular la válvula de bola de acero de la línea de desvío, cerrándola gradualmente de manera progresiva para tener el caudal requerido para el análisis de la formación de aire dentro de una tubería. Si se requiere caudal máximo en la línea principal cerrar completamente la válvula del desvío de caudal.

- La línea de desvío de caudal permite redirigir el caudal al tanque principal para poder controlar la velocidad de llenado del sistema y el caudal influente en la línea principal.

5.2. Medición de Presiones

En el equipo de laboratorio existen dos puntos de toma de presión a lo largo de la línea principal de conducción de agua. Dependiendo del caudal utilizado, es decir, de la apertura de la válvula de bola aliviadora de caudal, se debe considerar el equipo y la manera de realizar la medición de presión para encontrar las pérdidas de energía en dicho tramo:

- Para la medición de presión con piezómetros tubulares de agua, se debe tener completamente abierta la válvula de alivio de caudal en el desvío justo después de la bomba, esto permitirá que el sistema libere presión y evita la fuga de agua por la superficie de los tubos.



Fotografía 54. Válvula de medición de presión. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

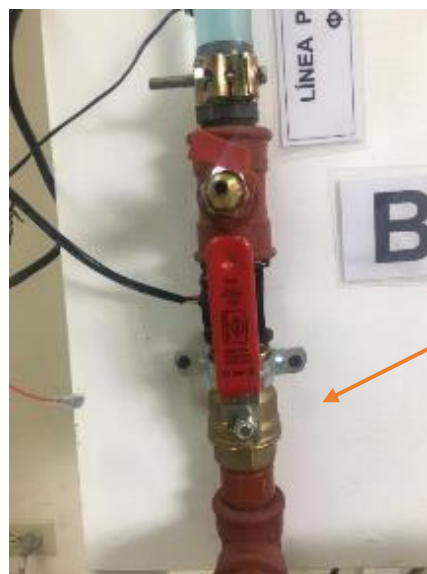
- Es necesario retirar el aire que está en los piezómetros tubulares de agua, para esto se abre por completo la válvula que permite el paso de agua a la línea principal mientras se mantiene totalmente cerrada la válvula de alivio de caudal. Se debe conectar la unión del piezómetro al punto de medición y se abre las válvulas rojas pequeñas que permiten el paso de agua al piezómetro hasta que salga el aire atrapado en los piezómetros. Se debe realizar esto por un instante hasta que salga el aire y antes de que el agua salga expulsada por arriba de los tubos.

- Abrir la válvula gradualmente para que el agua en los piezómetros este dentro del rango de medición en los dos puntos.



Manipular la válvula gradualmente hasta poder observar que los piezómetros marcan el nivel de agua dentro del rango de medición.

Fotografía 55. Válvula de regulación de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



La válvula de paso línea principal debe estar totalmente abierta

Fotografía 56. Válvula de paso línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Es un método de medida de presiones bajas, dado que si se quiere medir más presión el agua va a salir expulsada por la parte superior del tubo.
- Por otro lado, para medir presiones mayores se recomienda el uso del manómetro. Es necesario cerrar totalmente la válvula de alivio de caudal en el desvío inmediatamente después de la bomba y abrir la válvula que permite el flujo a la línea principal.



Fotografía 57. Conexión del manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 58. Válvula de regulación de caudal y línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

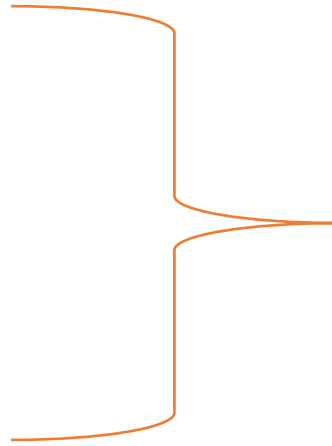
- Independientemente del equipo de medición de presión a utilizar se debe verificar que las válvulas pequeñas rojas estén cerradas para conectar los equipos en los puntos de medición. De igual manera, se debe verificar que el equipo este correctamente conectado, esto se logra al escuchar un click en el seguro interno de la unión.



Fotografía 59. Válvula medición de presión cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Válvula roja siempre cerrada. (únicamente abrirla al medir la presión en el punto siempre y cuando esté conectado el equipo de medición.)

- Los equipos de medición (manómetros y piezómetros) marcan la presión en cada punto de medición, mas no proporcionan la pérdida de energía existente, por lo que es necesario calcularla. Para saber realmente cuánta energía se disipa en fricción y por accesorios se debe restar la presión marcada entre los puntos de medición.
- Para los piezómetros de agua se toma la diferencia de alturas marcadas en los dos tubos de medición. En los manómetros únicamente se debe restar la primera lectura de la segunda y las unidades son en PSI. (1PSI = 0.704 mca.).
- Las lecturas de datos de los tubos permiten ver la diferencia en mca de presión entre el punto B y F, mas no indican la presión exacta en cada punto.



Los piezómetros de agua sirven únicamente para encontrar la diferencia de altura mas no la presión en cada punto medido.

Fotografía 60. Piezómetros tubulares de agua. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Indican presión en el punto de medición. Además, se puede restar las presiones para saber la pérdida existente en el tramo por fricción y por accesorios.

Fotografía 61. Medición con manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

5.3. Medición de Caudal

- Una vez tomadas las presiones se cierra las válvulas pequeñas rojas y se desconecta los equipos de medición. Si no se cierran dichas válvulas y se quita el equipo de medición con la bomba prendida, saldrá un chorro a presión por el punto de medición pudiendo provocar lesiones.
- No es necesario calcular el caudal dado que la línea principal tiene un sensor de flujo incorporado el cual envía datos en vivo a una computadora instalada bajo el punto C. La misma indica el caudal, la temperatura y el conteo total de volumen de agua transportado. El flujómetro digital indica el caudal que pasa por su sensor en lt/min, por lo que debe ser transformado manualmente a lt/s si se requiere.



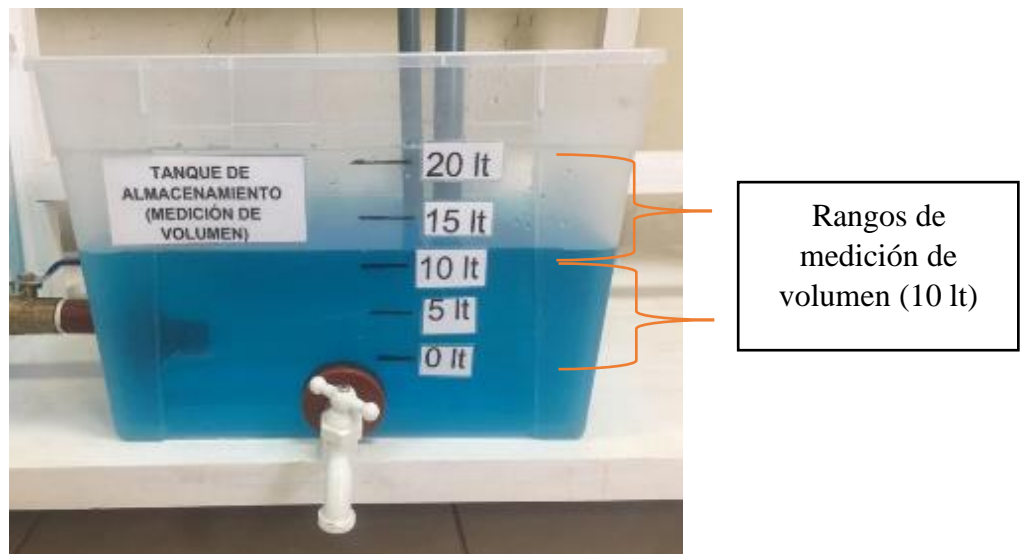
Fotografía 62. Caudalímetro digital. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Proceso secundario de medición de caudal en casos de avería en el caudalímetro digital:

- De igual manera, es posible medir el caudal mediante el conteo de tiempo de llenado del tanque de medición de volumen (5 lt o 10 lt), y realizando el cálculo respectivo para obtener la unidad de caudal lt/s.
- Cerrar la válvula que interconecta los dos tanques para impedir el paso de agua al tanque principal. Verificar que el nivel de agua del tanque este marcando 0 al momento de iniciar la medición. Cabe recalcar que los 0 lt son considerados al momento en que el agua cubre por completo la boquilla de succión de este.



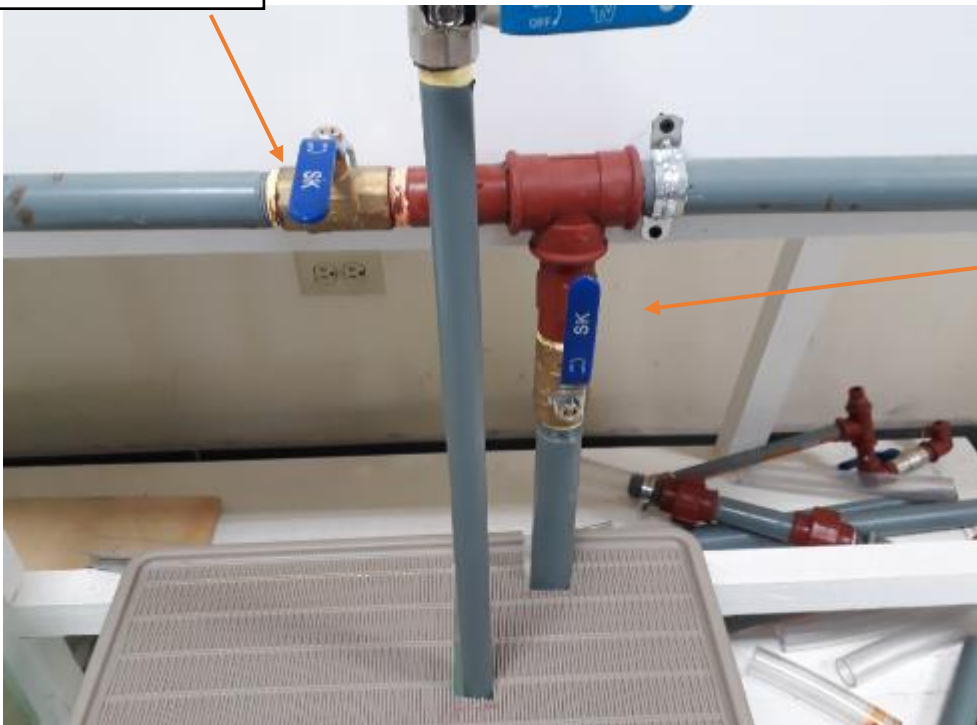
Fotografía 63. Válvula de interconexión de tanques cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 64. Tanque de almacenamiento (medición de volumen). (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Cerrar la válvula que permite la expulsión de agua en el tanque principal y abrir la válvula que permite la expulsión de agua al tanque de medición de volumen.

Válvula tanque principal (cerrada)



Válvula tanque de medición de volumen (abierta durante la medición)

Fotografía 65. Posición de válvulas de salida. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Tomar el tiempo que toma en llenar el tanque desde que el agua empieza a caer en el tanque secundario hasta que el nivel de agua llegue a marcar 10 lt, o hasta que el nivel de agua suba 10 lt desde que inicio el cronómetro.
- Una vez tomado el tiempo cerrar la válvula de paso del tanque secundario y abrir la válvula que permite expulsar el agua al tanque principal de succión. Además, abrir la válvula que interconecta los dos tanques.

ADVERTENCIA: Es indispensable evitar que el tanque principal se vacíe para no dañar el sistema de bombeo.

- Cuando los niveles de los dos tanques se igualen se cierra nuevamente la válvula que los interconecta y se vacía el tanque secundario con la llave de expulsión que tiene en su frente.
- Definido el flujo volumétrico como $Q = V/t$, entonces se debe dividir el volumen llenado de 10 lt para el tiempo (s) que tomo en llenarse y se obtendrá el caudal en lt/s.

NOTA: Este cálculo es un proceso secundario emergente en caso de daños en el flujómetro digital. Caso contrario leer los datos de caudal, temperatura y volumen de agua en la pantalla digital de la computadora ubicada en la frontal del tablero.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

- Operar apertura y cierre de los elementos del equipo para permitir la circulación de todo el caudal por la línea principal.
- Tomar medidas de los manómetros en los puntos de medición B, C y G para medir la presión (PSI) en dichos puntos.
- Tomar nota de la medición arrojada por el caudalímetro digital, tanto del caudal en l/min, como la temperatura del agua. Transformar el caudal para tener la unidad de lt/s.
- Determinar la velocidad de flujo:

$$v = Q/A$$

Donde,

v = velocidad del flujo (m/s)

Q = caudal (m³/s)

A = área interna de la tubería (m²)

- Determinar el número de Reynolds, tomando en cuenta la temperatura del agua y su viscosidad.

VISCOSIDAD CINEMÁTICA	
T (°C)	ν (m ² /s)
8	1,39E-06
9	1,35E-06
10	1,31E-06
11	1,27E-06
12	1,24E-06
13	1,20E-06
14	1,17E-06
15	1,14E-06
16	1,11E-03
17	1,08E-06
18	1,05E-06
19	1,03E-06
20	1,00E-06
21	9,80E-07
22	9,57E-07
23	9,35E-07
24	9,14E-07
25	8,93E-07

Tabla 48. Viscosidad cinemática. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

$$Re = \frac{D * V}{\nu}$$

Donde,

Re : número de Reynolds adimensional

D: diámetro interno de la tubería (m)

V: velocidad del flujo de agua (m/s)

ν : viscosidad cinemática (m²/s)

- Determinar la rugosidad absoluta ε con la Tabla 1. Rugosidad absoluta de materiales. (Guarín R. & Flores G., 2013) y luego obtener la relación entre la rugosidad absoluta y el diámetro interno (rugosidad relativa ε/Di).
- Determinar el factor de fricción una vez determinada la característica del flujo (laminar o turbulento)
- Obtener el coeficiente de fricción con la siguiente fórmula.

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right)^2}$$

- Calcular las pérdidas por fricción con la ecuación de Darcy-Weisbach.
- Contabilizar los accesorios en el tramo en análisis (A-G).
- Determinar la longitud equivalente para cada accesorio utilizando la Tabla 3. Longitud equivalente en diámetros de tubería (Le/Di). (Ordoñez Viñán & Quisnancela Salazar, 2013, 124 págs. 25,26).
- Calcular es coeficiente de resistencia

$$K_L = \left(\frac{Le}{Di} \right) * f_T$$

Donde,

Le : longitud equivalente

Di : diámetro interno de la tubería

f_T : factor de fricción en la zona de turbulencia completa

- Determinar las pérdidas menores y calcular la pérdida total de energía en el tramo A-G.
- Utilizar la ecuación de Bernoulli entre los tramos A-B, B-C y C-G con el fin de calcular las presiones teóricas. Tomar en cuenta la altura de bombeo como TDH= 3 m (dato obtenido del diseño).
- Comparar las presiones medidas en los puntos B, C y G con las presiones teóricas calculadas en el paso 15.
- Abrir las válvulas de aire y tomar lectura de los datos de presión en B, C y G.
- Comparar los datos obtenidos de presión en los puntos de análisis con y sin el accionar de las válvulas de aire.

TABLA DE RESULTADOS

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN POR TRAMO:

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi
SUCCIÓN-BOMBA	PVC 1"		24,3	0,51						

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi
A-B	PVC 1"		24,3							

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi
B-C	PVC 1"		24,3							

TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi
C-G	PVC 1"		24,3							

PÉRDIDAS MENORES POR TRAMO:

TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ϵ/Di	Ft	K	hmu(m)	hmi (m)
A-B											

TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ϵ/Di	Ft	K	hmu(m)	hmi (m)
B-C											

TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ϵ/Di	fT	K	hmu(m)	hmi (m)
C-G											

PRESIÓN:

PA/γ		
Q	l/s	
V	m/s	
$V_b^2/2g$		
ΔH	0 m	
Hf	m	
Hm	m	
PRESIÓN mca PSI		

PB/γ			
Hbomba	3 mca	4,2614	PSI
Q	l/s		
V	m/s		
$V_b^2/2g$			
ΔH	0,84 m		
hf	m		
hm	m		
PRESIÓN mca PSI			

PC/γ			
Hbomba	3 mca	4,2614	PSI
Q	l/s		
V	m/s		
$V_b^2/2g$			
ΔH	0,6 m		
hf	m		
hm	m		
PRESIÓN mca PSI			

PG/γ		
Q	l/s	
V	m/s	
$V_b^2/2g$		
ΔH	-0,35 m	
hf	m	
hm	m	
PRESIÓN mca PSI		

PUNTO EN ESTUDIO	CON VÁLVULAS DE AIRE CERRADAS		CON VÁLVULAS DE AIRE ABIERTAS
	PRESIÓN TEÓRICA (PSI)	PRESIÓN MEDIDA (PSI)	PRESIÓN MEDIDA (PSI)
B			
C			
G			

7. CONCLUSIONES

Concluir con los resultados obtenidos y una breve comparación de los datos medidos con los calculados teóricamente.

Comparar lo medido con los dispositivos de medición de presión con los resultados de presión abriendo las válvulas de aire.

Analizar la razón de la variación de los resultados y presentar el error obtenido.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones para mejorar el uso del equipo o mediciones realizadas.

Recomendaciones en cuanto al uso de válvulas de aire en diferentes posiciones.

Recomendaciones en cuanto al uso de válvulas de purga en diferentes localizaciones.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Ordoñez Viñán , M. A., & Quisnancela Salazar, K. G. (4 de Enero de 2013). Automatización del banco de pérdidas del laboratorio de turbomaquinaria de la Facultad Mecánica. Obtenido de Tesis de grado:
<http://dspace.esoch.edu.ec/bitstream/123456789/2961/1/15T00546.pdf>
- Mott, R. L. (2006). Mecánica de fluidos. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación de México.
- Giles, R. V., & Evett, J. B. (2003). Mecánica de los fluidos e hidráulica. Madrid: McGraw-Hill.
- Guarín R., J. A., & Flores G., J. C. (26 de Abril de 2013). Diseño de un sistema de generación a partir de una picocentral hidroeléctrica. Pereira, Pereira, Colombia.
- White, F. (2016). Fluid Mechanics. 8th Edition. Nueva York: McGraw-Hill International Book Company.
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., & Ramadan, B. H. (2015). Mecánica de fluidos. México D.F.: Cengage Learning .

4.2.2 PRÁCTICA 2

PURGA DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN A PRESIÓN CON Y SIN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE AIRE

RESUMEN

Se determina la correcta ubicación de los sistemas usados para expulsar el agua del sistema, así como la cantidad de válvulas necesarias para un óptimo vaciado. Se modela el funcionamiento de las válvulas de aire al momento de vaciar el sistema.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

- Modelar el accionar de las válvulas de aire al momento de realizar la purga de agua del sistema.

1.2. Objetivos Específicos

- Establecer puntos adecuados para la instalación de sistemas de purga de agua en la línea de conducción.
- Identificar los elementos y accesorios básicos para el correcto funcionamiento de los sistemas de purga.
- Accionar el sistema de vaciado de agua con y sin el funcionamiento de las válvulas de aire.
- Analizar consecuencias, ventajas y desventajas de la instalación de las válvulas de aire al momento de vaciar cualquier sistema a presión de agua o cualquier otro fluido.

2. MARCO TEÓRICO

El éxito del funcionamiento de una línea de conducción de agua recae en gran parte en el proceso de mantenimiento e inspección que se dispone en el proyecto. Para el mantenimiento es necesario realizar el vaciado de agua de las tuberías, mediante mecanismos de purga eficientes.

Si la conducción presenta pendientes muy grandes y variables, al momento de realizar el vaciado, se puede generar acumulación de sedimentos en las partes más bajas de la conducción. Para evitar taponamientos, es necesario colocar sistemas de vaciado con su localización en las cotas más bajas que se disponga, de tal forma que la purga de agua del sistema se realice integralmente. (Narváez, UIDE, 2011, pág. 65)

El mantenimiento y limpieza de una conducción a presión es vital para que al trabajar el sistema lo haga de forma eficiente. Es preciso aclarar que el intervalo de tiempo de ejecución de dicho mantenimiento dependerá de las cualidades del proyecto (volumen de manejo de fluido, materiales), pero será más corto y estricto cuando el sistema atraviese por topografía irregular que provoque que la tubería tenga pendientes fuertes y cambiantes, generando espacios de acumulación de sedimentos grandes, reduciendo el área del flujo del agua. (Organización Panamericana de la Salud, 2004, pág. 18)

Dicha obstrucción del diámetro interno de la tubería puede ser parcial o completa, generando daños en los puntos más vulnerables de la conducción (conexiones, tuberías corroídas) y provocando incluso la rotura de estas.

“La falta de limpieza de sedimentos puede provocar de igual manera un deterioro acelerado de los componentes mecánicos como las válvulas o las bombas, generando gastos no contemplados en el funcionamiento del sistema” (Rodríguez Ayala, 2014, pág. 45).

3. MATERIALES Y EQUIPOS

Tablero de tuberías y accesorios



Fotografía 66Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Cronómetro

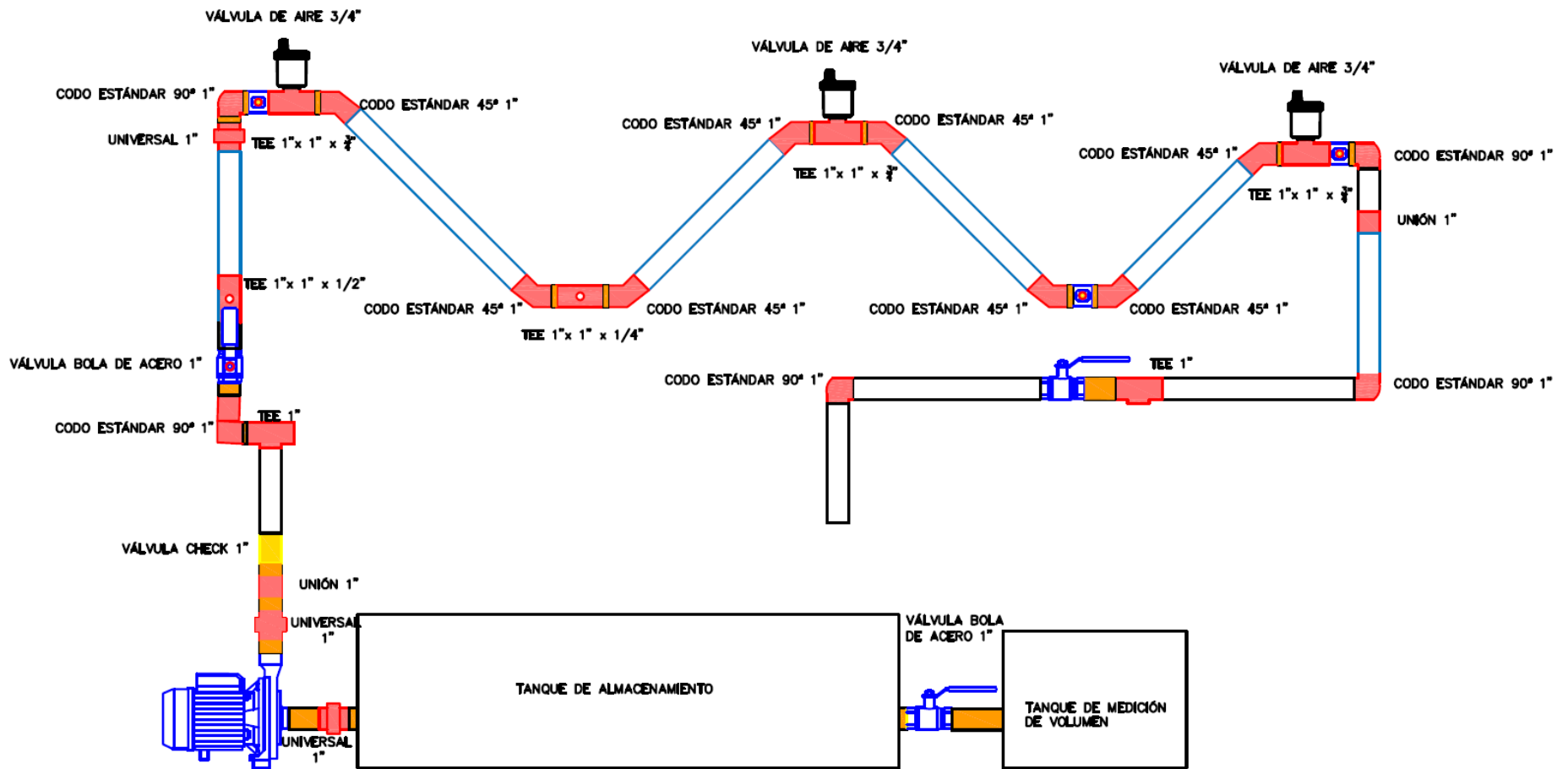
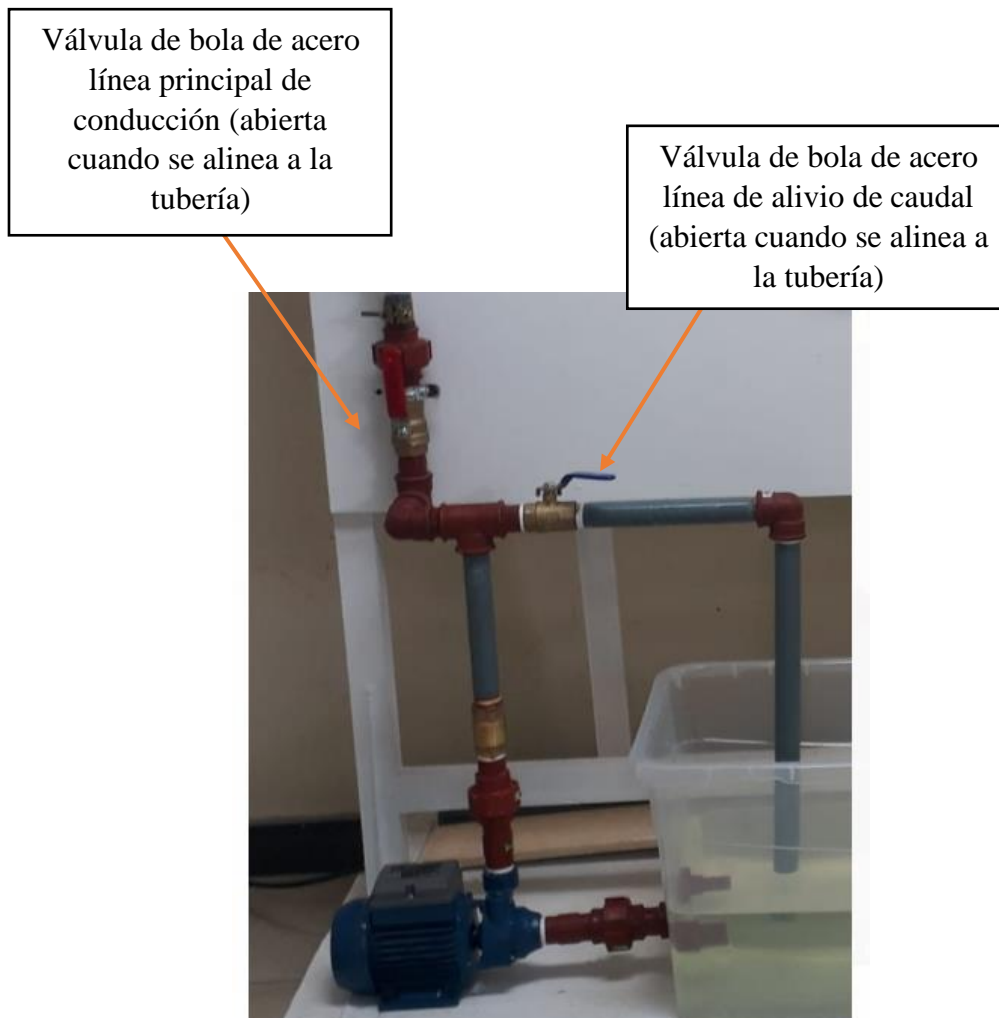


Figura 35. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

4. INSTRUCCIONES

4.1. Encendido del Equipo

- Para el encendido del equipo se debe verificar que tanto la válvula de bola principal como la ubicada en la línea de desvío de caudal estén abiertas totalmente. Dichas válvulas se encuentran inmediatamente después de la bomba. Las dos válvulas estarán completamente abiertas cuando la manija este alineada completamente al eje longitudinal de la tubería a la que están conectadas. De igual manera las válvulas se encuentran cerradas cuando la manija esta perpendicular al eje longitudinal de la tubería.



Fotografía 67. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

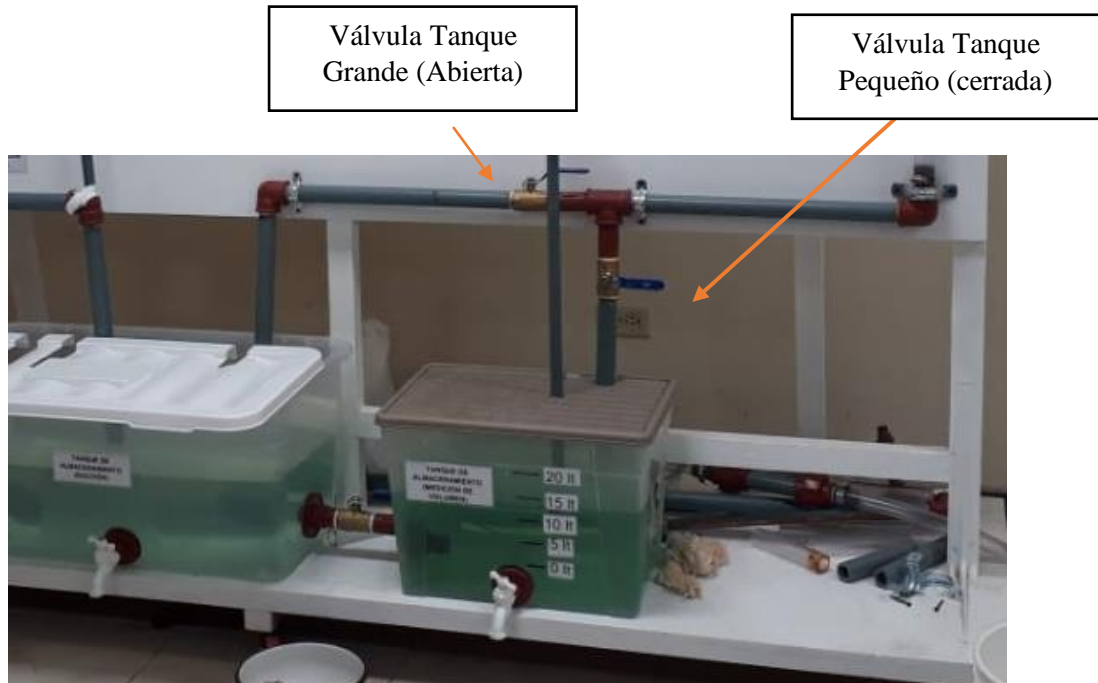
- De igual manera verificar que las dos válvulas de bola ubicadas en la zona de purga del sistema estén completamente cerradas para tener una línea de conducción con una sola salida de agua al final del tramo.

Válvulas de purga de acero (abierta cuando se alinea a la tubería)



Fotografía 68. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- A continuación, verificar que la válvula de desfogue de agua del tanque principal esté abierta y la válvula de desfogue al tanque de medición de caudal esté cerrada completamente.



Fotografía 69. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Nota: Estos procedimientos se los realiza para tener un flujo de agua constante sin bloqueos, evitando daños en el sistema de bombeo, previniendo la explosión de la bomba y el vaciado del tanque de succión, garantizando que la bomba succione únicamente agua.

5. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

5.1. Actividades preparatorias

- Verificar que las válvulas de aire estén taponadas previo al encendido.
- Llenar el tanque principal de succión hasta la marca indicada en la pared frontal. Verificar que la válvula de bola de acero que interconecta los dos tanques esté cerrada para trabajar únicamente con el tanque principal.
- De igual manera verificar que las válvulas de medición de presión se encuentren completamente cerradas.
- Cuando se haya verificado todos los puntos previamente dictados, se procede a encender la regleta ubicada en la parte posterior del tablero para activar tanto la bomba como el flujómetro.
- Permitir el funcionamiento normal del equipo a caudal máximo, verificando que tanto las válvulas de aire como las de purga estén cerradas.

- Sincronizar el cronómetro a utilizar con el apagado del equipo.

5.2. Medición de tiempos de purga

Una línea de conducción es posible vaciarla por tramos o módulos dependiendo de la topografía y de la cantidad de mecanismos de purga instalados.

- Se apaga el equipo desde la regleta ubicada en la parte posterior y a la vez se cierra las dos válvulas de salida de agua al final de la línea de conducción y la válvula de entrada a la línea principal. Esto se lo realiza para poder estancar el agua en el tramo principal y generar más tiempo de apreciación para el estudiante.



Fotografía 70. Válvula de entrada cerrada completamente. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 71. Válvula de salida. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Se realiza la purga del sistema iniciando el cronómetro y abriendo las válvulas que indica cada escenario propuesto y se detiene el cronómetro cuando se observe el vaciado total o bien el estancamiento de agua.

- Registrar los tiempos en cada escenario.
- Tomar nota de los tramos estancados de agua y variaciones entre escenarios.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Escenarios propuestos:

- ESCENARIO A: únicamente abierta una válvula de purga celeste. Medir el tiempo tomado en vaciar el sistema. De ser el caso, parar el tiempo cuando se pueda apreciar que el agua se ha estancado en lugares difíciles de salir. Registrar el tiempo y los lugares en que se estanca el agua.
- ESCENARIO B: únicamente abierta la otra válvula celeste de purga cerrando la anterior. Repetir el proceso del escenario A.
- ESCENARIO C: abiertas las dos válvulas celestes de purga, pero cerradas las válvulas de paso y salida de la línea principal. Repetir el proceso empleado.
- ESCENARIO D: abiertas todas las válvulas del sistema de salida y las dos de purga. Cerrar la válvula roja de entrada de agua. Repetir el proceso de medición de tiempo.
- ESCENARIO E: todas las válvulas del sistema abiertas. Repetir el proceso de medición de tiempo.
- ESCENARIO F: abierta únicamente la entrada (válvula roja) y la salida. Las válvulas celestes de purga y la de control de caudal cerradas. Repetir el proceso de medición de tiempo.
- ESCENARIO G: abiertas únicamente la entrada (válvula roja), la salida y la válvula de regulación de caudal. Las válvulas celestes de purga cerradas. Repetir el proceso de medición de tiempo.

NOTA: Todos los escenarios deben ser ejecutados dos veces, una con las válvulas de aire cerradas y otra con las válvulas de aire abiertas. Los tiempos medidos que exceden el minuto han sido descartados, y deberán ser descartados en la práctica de laboratorio.

TABLA DE RESULTADOS

PURGA DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN A PRESIÓN				
ESCENARIO	TIEMPO MEDIDO SIN VÁLVULA DE AIRE [S]	OBSERVACIONES	TIEMPO MEDIDO CON VÁLVULA DE AIRE [S]	OBSERVACIONES
A				
B				
C				
D				
E				
F				
G				

NOTA: Iniciar la toma de tiempos al empezar la purga del sistema y terminar el cronometraje cuando se aprecie que el agua ya no sale del sistema y se estanca. Las observaciones deben ir acompañadas de la localización de los puntos donde ocurre el estancamiento de agua.

7. CONCLUSIONES

Concluir indicando los resultados obtenidos, comparando entre los diferentes escenarios y analizando posibles errores de colocación en los mecanismos de purga.

Establecer las secciones donde se estanca el agua y posibles soluciones.

Establecer los puntos adecuados para la colocación de sistemas de purga y evidenciar el beneficio o déficit en el accionar de válvulas de aire al momento de expulsar el agua.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones para mejorar el proceso de medición.

Recomendaciones de otros posibles puntos de purga.

Recomendaciones para evitar el estancamiento de agua.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Rodríguez Ayala, Y. M. (11 de septiembre de 2014). Mejoramiento del sistema de bombeo para evacuación eficiente de aguas subterráneas en volcan Compañía Minera S.A.A - Unidad San Cristobal. Obtenido de Tesis:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3215/Rodriguez%20Ayala.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Narváez, W. D. (15 de Julio de 2011). UIDE. Obtenido de Rehabilitación del Sistema de Agua Potable Sambache- Salcoto y Diseño de la Línea de Impulsión al Tanque de Reserva Mushuñan:
<https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/2047/1/T-UIDE-1177.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud. (14 de Septiembre de 2004). Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimiento de agua rural. Obtenido de OPS:
<https://www.itacanet.org/esp/agua/Seccion%202%20Gravedad/disenosistemagua/Gu%C3%ADa%20de%20dise%C3%B1o%20para%20l%C3%ADneas%20de%20conducci%C3%B3n.pdf>

4.2.3 PRÁCTICA 3

EFFECTOS EN LA PRESIÓN, POTENCIA Y ENERGÍA DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN CON Y SIN EL ACCIONAR DE VÁLVULAS DE AIRE

RESUMEN

Se mide los efectos causados por el accionar de válvulas de aire en la presión que presenta la línea de conducción.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

- Determinar el cambio de presión al accionar las válvulas de aire en los puntos de medición de presión con diferentes caudales.

1.2. Objetivos Específicos

- Tomar datos de presión con diferentes caudales (10 a 30 lt/min) con las válvulas de aire cerradas.
- Tomar datos de presión con diferentes caudales (10 a 30 lt/min) con las válvulas de aire abiertas.
- Determinar las consecuencias funcionales del sistema con y sin el accionar de las válvulas de aire.

2. MARCO TEÓRICO

Las válvulas de aire son dispositivos hidromecánicos que permiten controlar el ingreso y salida de aire en un sistema hidráulico. Su instalación puede brindar al operario o responsable la posibilidad de controlar la formación y acumulación de las bolsas de aire, especialmente en los puntos altos del sistema de tuberías cuando se encuentra trabajando a presión. (Vayremex Mr., 2018, pág. 3)

Además, son eficientes en los sistemas presurizados de conducción de agua en el llenado de tuberías, al expulsar el aire interno de la tubería a través de sus orificios para tener únicamente fluido dentro de la conducción; en la operación del sistema a presión, al expulsar el aire acumulado en el sistema generando un trabajo más eficiente de la bomba; en el vaciado de tuberías al combatir la presión negativa generada al purgar el sistema, evitando la succión en la tubería induciendo aire al mismo. (Thomas, 2003, pág. 4)

“Las ventosas pueden ser de doble acción, al aliviar el sistema contra el aire y el vacío, o de triple acción generando alivio de presión, vacío y acción” (Plastigama, 2018, pág. 18).

POTENCIA HIDRÁULICA DE LA BOMBA:

$$P_h = \gamma * Q * H$$

Donde,

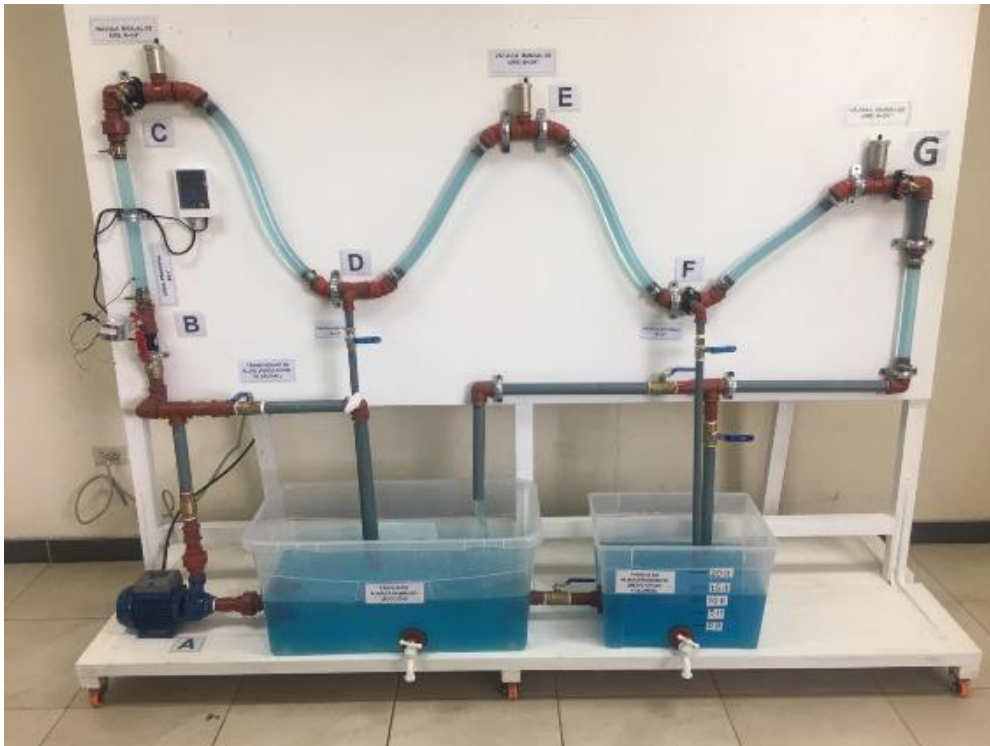
P_h : potencia hidráulica (W)

γ : peso específico del agua (9807 N/m³)

Q : caudal ($\frac{m^3}{s}$)

3. MATERIALES Y EQUIPOS

Tablero de tuberías y accesorios



Fotografía 72. Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Manómetro

Caudalímetro digital

A continuación, se presenta el esquema del tablero con medidas:

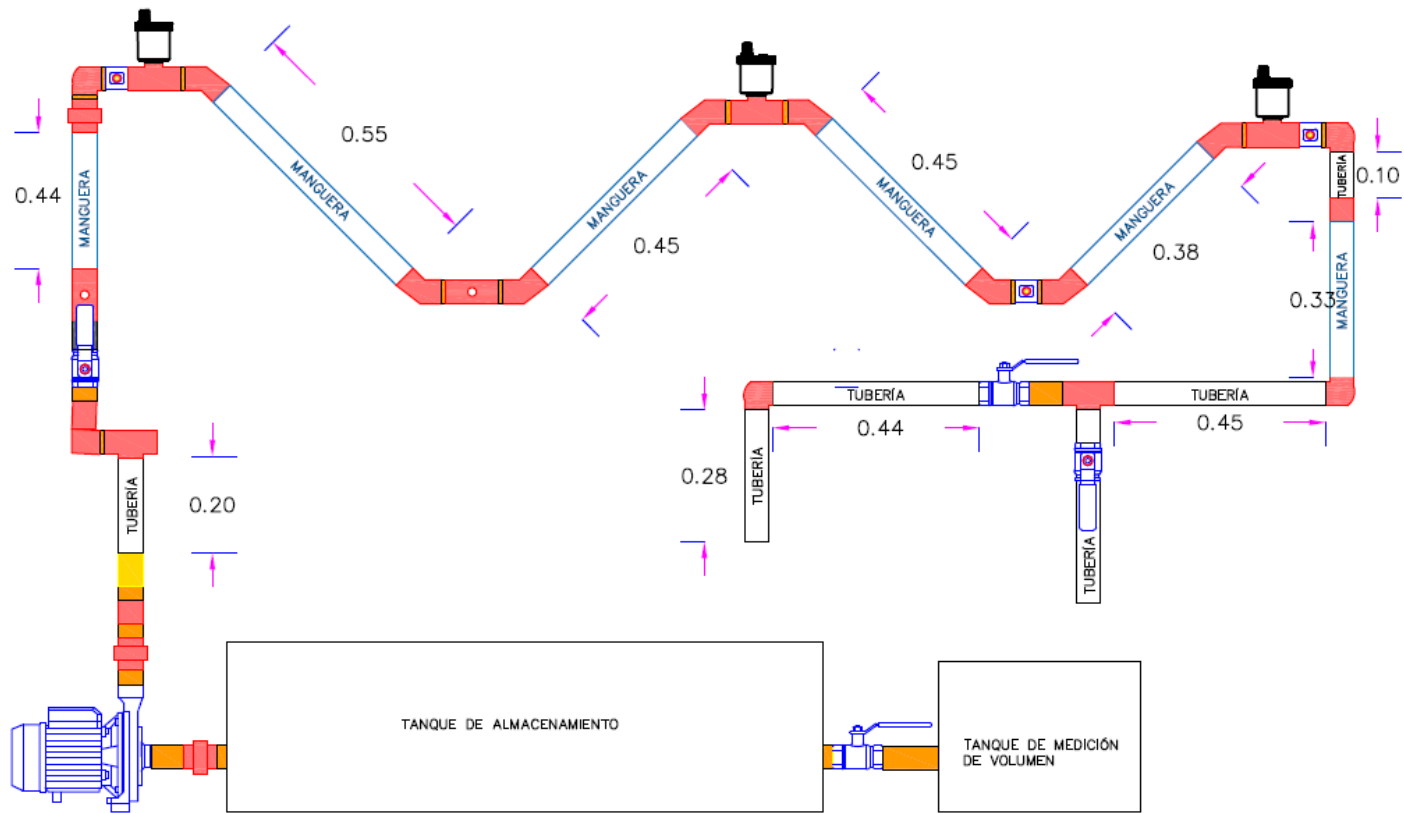
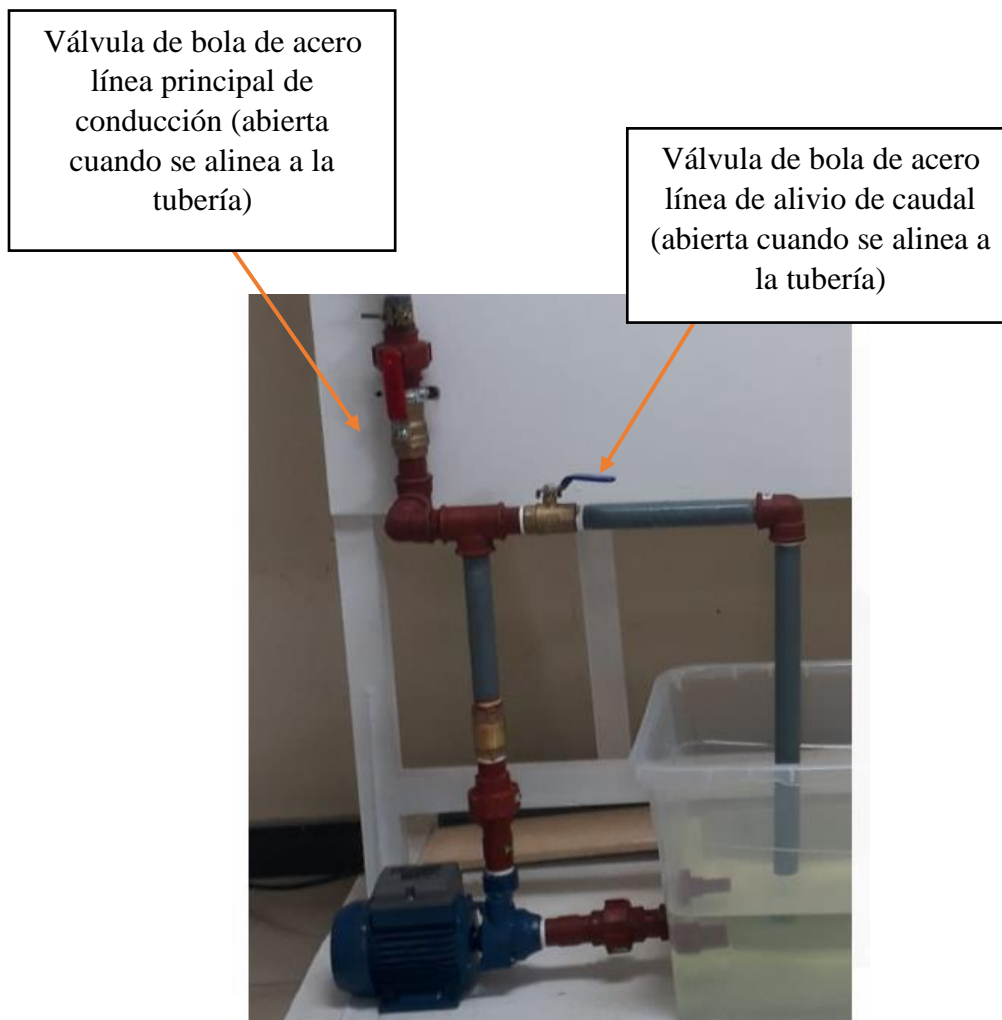


Figura 36. Dimensión de tuberías y mangueras. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

4. INSTRUCCIONES

4.1. Encendido del Equipo

- Para el encendido del equipo se debe verificar que tanto la válvula de bola principal como la ubicada en la línea de desvío de caudal estén abiertas totalmente. Dichas válvulas se encuentran inmediatamente después de la bomba. Las dos válvulas estarán completamente abiertas cuando la manija este alineada completamente al eje longitudinal de la tubería a la que están conectadas. De igual manera las válvulas se encuentran cerradas cuando la manija esta perpendicular al eje longitudinal de la tubería.



Fotografía 73. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

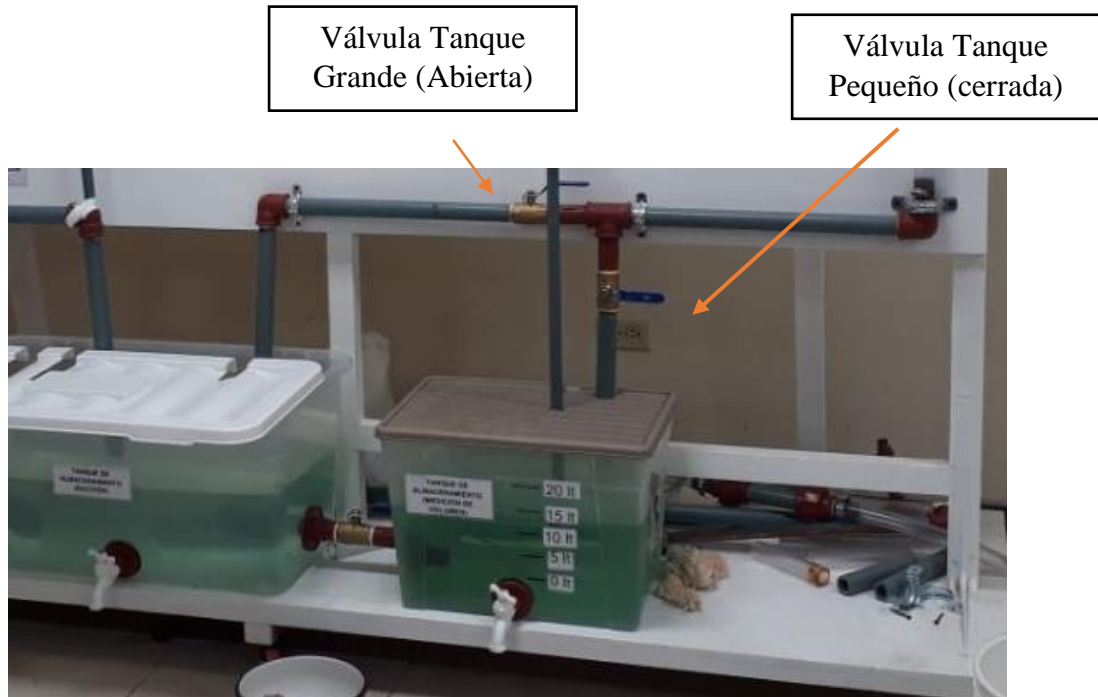
- De igual manera verificar que las dos válvulas de bola ubicadas en la zona de purga del sistema estén completamente cerradas para tener una línea de conducción con una sola salida de agua al final del tramo.

Válvulas de purga de acero (abierta cuando se alinea a la tubería)



Fotografía 74. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- A continuación, verificar que la válvula de desfogue de agua del tanque principal esté abierta y la válvula de desfogue al tanque de medición de caudal esté cerrada completamente.



Fotografía 75. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Nota: Estos procedimientos se los realiza para tener un flujo de agua constante sin bloqueos, evitando daños en el sistema de bombeo, previniendo la explosión de la bomba y el vaciado del tanque de succión, garantizando que la bomba succione únicamente agua.

5. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

5.1. Actividades preparatorias

- Verificar que las válvulas de aire estén taponadas previo al encendido.
- Llenar el tanque principal de succión hasta la marca indicada en la pared frontal. Verificar que la válvula de bola de acero que interconecta los dos tanques esté cerrada para trabajar únicamente con el tanque principal.
- Cuando se haya verificado todos los puntos previamente dictados, se procede a encender la regleta ubicada en la parte posterior del tablero para activar tanto la bomba como el flujómetro.
- Al momento del encendido del equipo se debe manipular la válvula de bola de acero de la línea de desvío, cerrándola gradualmente de manera progresiva para tener el caudal inicial requerido de 10 lt/min.

5.2. Medición de Presiones

En el equipo de laboratorio existen dos puntos de toma de presión a lo largo de la línea principal de conducción de agua. Para esta práctica se utilizará únicamente los manómetros en el punto B.

- Para medir las presiones de manera fácil y rápida se recomienda el uso del manómetro. Es necesario cerrar totalmente la válvula de alivio de caudal en el desvío inmediatamente después de la bomba y abrir la válvula que permite el flujo a la línea principal.



Fotografía 76. Conexión del manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)



Fotografía 77. Válvula de regulación de caudal y línea principal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Independientemente del equipo de medición de presión a utilizar se debe verificar que las válvulas pequeñas rojas estén cerradas para conectar los equipos en los puntos de medición. De igual manera, se debe verificar que el equipo este correctamente conectado, esto se logra al escuchar un click en el seguro interno de la unión.



Fotografía 78. Válvula medición de presión cerrada. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Válvula roja siempre cerrada. (únicamente abrirla al medir la presión en el punto siempre y cuando esté conectado el equipo de medición.)



Indican presión en el punto de medición. Además, se puede restar las presiones para saber la pérdida existente en el tramo por fricción y por accesorios.

Fotografía 79. Medición con manómetro. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

5.3. Medición de Caudal

- No se desconectará el manómetro del punto B en toda la práctica, a menos que éste no se encere para cada toma de datos de presión.
- No es necesario calcular el caudal dado que la línea principal tiene un sensor de flujo incorporado el cual envía datos en vivo a una computadora instalada bajo el punto C. La misma indica el caudal, la temperatura y el conteo total de volumen de agua transportado.



Fotografía 80. Caudalímetro digital. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- Para la utilización de los manómetros de glicerina, la válvula de globo (válvula roja) debe estar completamente cerrada, la válvula de bola de PVC (válvula verde) debe estar completamente abierta, no se necesita liberación de presión en el sistema.
- El caudal inicial de la practica será de 10 lt/min, debido a que caudales menores no permiten la circulación del agua en todo el sistema hasta el punto de salida.

NOTA: el flujómetro no arroja un valor exacto de caudal ya que este varía por la turbulencia en la succión y la cercanía del sensor a la bomba. Por esta razón, se aceptarán valores que excedan hasta 0.20 lt/min hacia arriba o hacia debajo de la marca deseada.

6. CÁLCULO DE RESULTADOS

- Con las válvulas de aire cerradas encender el equipo con la válvula de regulación de caudal totalmente abierta y la de entrada de agua a la línea principal (válvula roja) cerrada. Manipular la válvula de desvío de caudal cerrándola hasta obtener 10 lt/min.
- Conectar el manómetro en el punto B y abrir la válvula roja del punto de medición para tomar nota de la presión marcada en [PSI].
- Transformar la presión a $[\frac{kg}{m^2}]$.
- Verificar la temperatura del agua y establecer su densidad en $[\frac{kg}{m^3}]$. Analizar si existen tramos de la línea principal con burbujas de aire notables y anotarlo en observaciones.
- Dividir la presión para la densidad para obtener la altura de bombeo en [m].
- Determinar la potencia hidráulica de la bomba
$$P_h = \gamma * Q * H$$
- Calcular la energía que se necesita para una hora de trabajo.
- Una vez registrados los datos con las válvulas cerradas, accionar las mismas y observar lo ocurrido en el caudalímetro.
- Regular el caudal que pasa por la línea principal para volver a obtener los mismos 10 lt/min con las válvulas de aire abiertas.
- Tomar nota de la presión en el punto B.
- Repetir el proceso de cálculo para obtener la altura de bombeo en [m].
- Comparar los datos obtenidos con y sin el accionar de válvulas de aire.
- Repetir el proceso para caudales desde los 10 a 30 lt/min, con rangos de variación de 5 lt/min.

TABLA DE RESULTADOS

CAUDAL		DENSIDAD (kg/m ³)	SIN VÁLVULAS DE AIRE						CON VÁLVULAS DE AIRE						PÉRDIDA DE ALTURA DE BOMBEO
			PRESIÓN		TDH	POTENCIA		ENERGÍA	PRESIÓN		TDH	POTENCIA		ENERGÍA	
(lt/min)	(lt/s)		PSI	kg/m ²	m	W	hp	J	PSI	kg/m ²	m	w	hp	J	
10															
15															
20															
25															
30															

Rango caudal marcado	Temperatura	Observaciones tramos con aire

7. CONCLUSIONES

Concluir con los resultados obtenidos y el análisis respectivo de la razón de la variación de la presión medida al accionar las válvulas de aire.

Concluir con ventajas o desventajas del accionar las válvulas de aire en el funcionamiento del sistema basándose en lo observado durante la práctica.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones que puedan sugerir mejoras para el desarrollo de futuras prácticas.

Recomendaciones para obtener mayores beneficios en la presión del sistema según la localización de las válvulas de aire.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Thomas, S. (2003). Air management in water distribution systems, a new understanding of air transfer, clear water legacy. Ontario: Mapalé.
- Vayremex Mr. (28 de enero de 2018). Eliminadora de aire modelo EAP. Obtenido de Vayremex: <http://vayremex.com/nw-admin/files/pdf/VEA-EAP-2018.pdf>
- Plastigama. (14 de Junio de 2018). Fichas de Productos. Obtenido de Línea de Complementos: <http://plastigamawavin.com/wp-content/uploads/2018/09/Li%CC%81nea-de-Complemetos.pdf>
- Yambombo, J. (24 de Agosto de 2012). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios*. Obtenido de Universidad Central del Ecuador: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/325>

4.2.4 PRÁCTICA 4

LLENADO DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN CON EL ACCIONAR Y SIN EL ACCIONAR DE LAS VÁLVULAS DE AIRE INSTALADAS

RESUMEN

Analizar las consecuencias de accionar las válvulas de aire al momento del arranque del equipo y posterior llenado de las tuberías de una línea de conducción de agua a presión.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

- Determinar el tiempo empleado en llenar por completo la línea principal de conducción de agua a caudal máximo con y sin el uso de válvulas de aire.

1.2. Objetivos Específicos

- Calcular el tiempo que toma en llenarse a caudal máximo las tuberías de la línea de conducción cuando las válvulas de aire están cerradas.
- Calcular el tiempo que toma en llenarse a caudal máximo las tuberías de la línea de conducción cuando las válvulas de aire están en funcionamiento.
- Calcular el ahorro de tiempo de llenado en porcentaje.
- Visualizar el proceso de llenado al accionar una válvula de aire a caudales bajos (10 a 15 l/min).

2. MARCO TEÓRICO

Las válvulas de aire son dispositivos hidromecánicos que permiten controlar el ingreso y salida de aire en un sistema hidráulico. Su instalación puede brindar al operario o responsable la posibilidad de controlar la formación y acumulación de las bolsas de aire, especialmente en los puntos altos del sistema de tuberías cuando se encuentra trabajando a presión. (Vayremex Mr., 2018, pág. 3)

Además, son eficientes en los sistemas presurizados de conducción de agua en el llenado de tuberías, al expulsar el aire interno de la tubería a través de sus orificios para tener únicamente fluido dentro de la conducción; en la operación del sistema a presión, al expulsar el aire acumulado en el sistema generando un trabajo más eficiente de la bomba; en el vaciado de tuberías al combatir la presión negativa generada al purgar el sistema, evitando la succión en la tubería induciendo aire al mismo. (Thomas, 2003, pág. 4)



Figura 37. Funciones de una válvula de aire en una línea de conducción de agua potable. (Iglesias-Rey, Fuertes-Miquel, García-Mares, & Martínez-Solano, 2016)

3. MATERIALES Y EQUIPOS

Tablero de tuberías y accesorios



Fotografía 81. Tramo de análisis. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Cronómetro

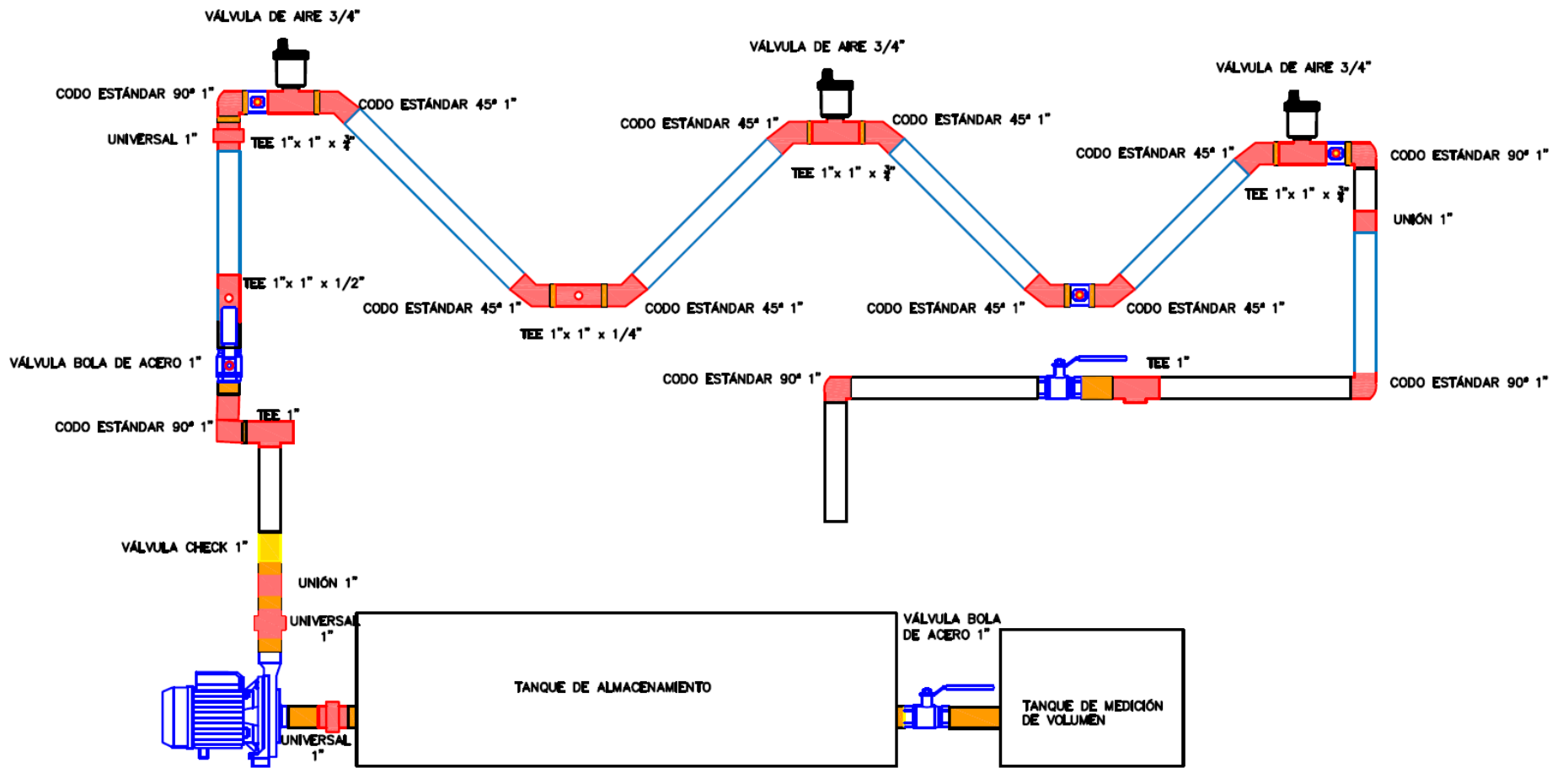
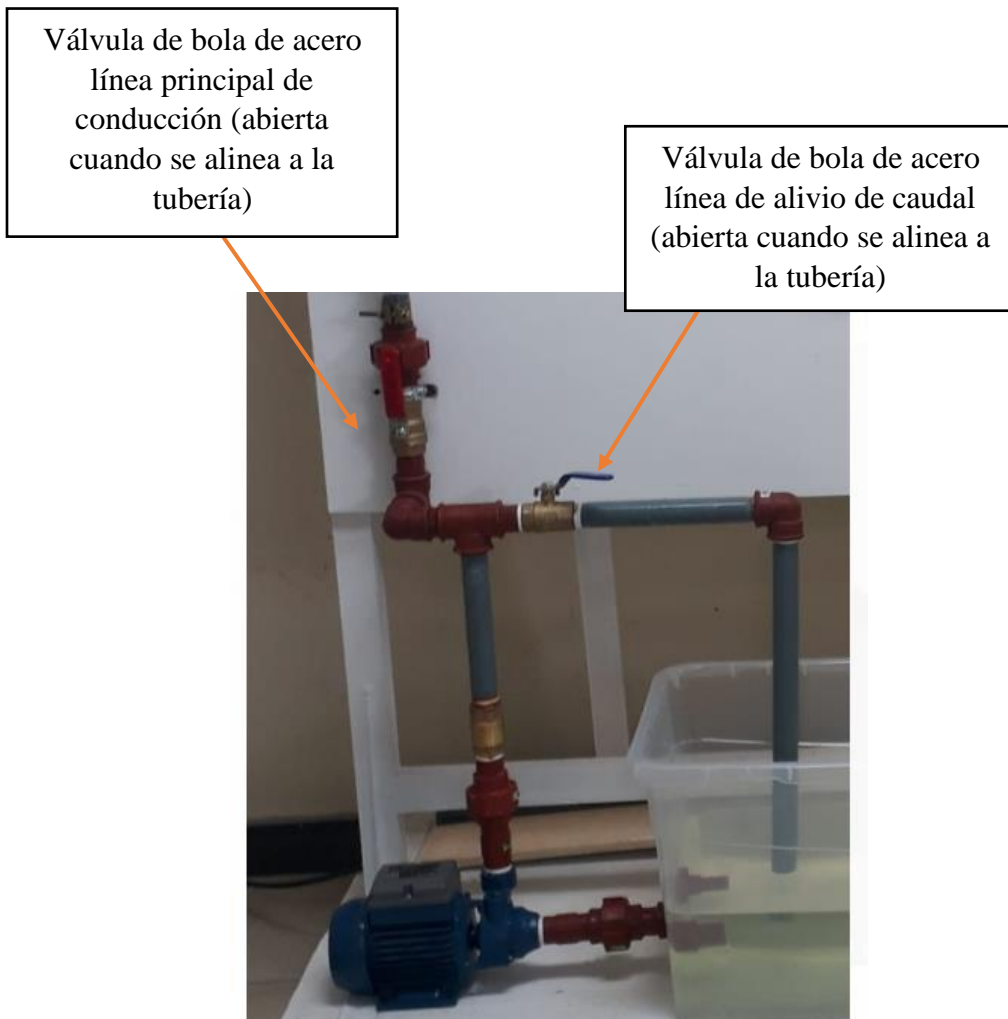


Figura 39. Ubicación accesorios. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

4. INSTRUCCIONES

4.1. Encendido del Equipo

- Para el encendido del equipo se debe verificar que tanto la válvula de bola principal como la ubicada en la línea de desvío de caudal estén abiertas totalmente. Dichas válvulas se encuentran inmediatamente después de la bomba. Las dos válvulas estarán completamente abiertas cuando la manija este alineada completamente al eje longitudinal de la tubería a la que están conectadas. De igual manera las válvulas se encuentran cerradas cuando la manija esta perpendicular al eje longitudinal de la tubería.



Fotografía 82. Válvulas de ingreso línea principal y alivio de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

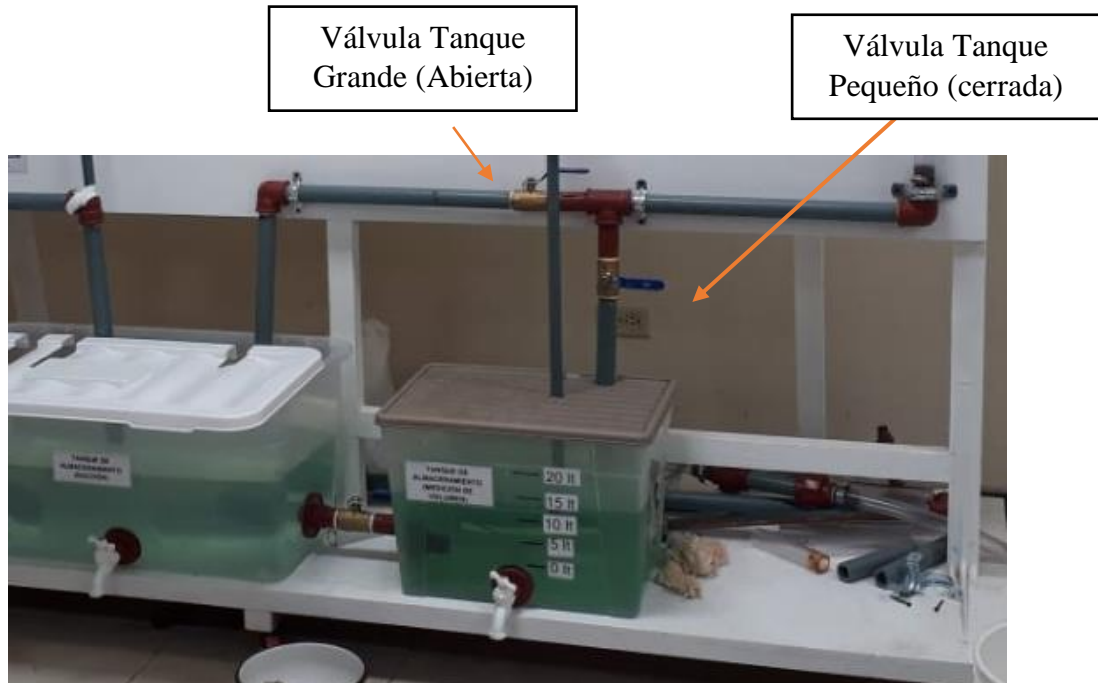
- De igual manera verificar que las dos válvulas de bola ubicadas en la zona de purga del sistema estén completamente cerradas para tener una línea de conducción con una sola salida de agua al final del tramo.

Válvulas de purga de
acero (abierta cuando
se alinea a la tubería)



Fotografía 83. Válvulas de purga. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

- A continuación, verificar que la válvula de desfogue de agua del tanque principal esté abierta y la válvula de desfogue al tanque de medición de caudal esté cerrada completamente.



Fotografía 84. Válvulas de control de salida de caudal. (Fuente: Fotografía de Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Nota: Estos procedimientos se los realiza para tener un flujo de agua constante sin bloqueos, evitando daños en el sistema de bombeo, previniendo la explosión de la bomba y el vaciado del tanque de succión, garantizando que la bomba succione únicamente agua.

5. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR

5.1. Actividades preparatorias

- Verificar que las válvulas de aire estén taponadas previo al encendido.
- Llenar el tanque principal de succión hasta la marca indicada en la pared frontal. Verificar que la válvula de bola de acero que interconecta los dos tanques esté cerrada para trabajar únicamente con el tanque principal.
- Cuando se haya verificado todos los puntos previamente dictados, se procede a encender la regleta ubicada en la parte posterior del tablero para activar tanto la bomba como el flujómetro.

5.2. Medición de tiempo de llenado

- Se busca contrastar los tiempos de llenado de la línea principal de conducción del equipo con y sin el funcionamiento de las válvulas de aire, por lo que es necesario sincronizar el cronómetro con el cierre de la válvula de alivio de caudal.

- El cronómetro se debe detener al observar un flujo constante de agua en las tuberías flexibles sin burbujas de aire flotando y cuando el caudal se regulariza en el flujómetro digital.
- Es necesario que una persona se encargue de la manipulación de las válvulas de paso de agua y otra del cronometraje.

6. CÁLCULO DE RESULTADOS

- Cerrar completamente la válvula de regulación de caudal con la válvula de paso a la línea principal abierta completamente y al mismo tiempo empezar el cronometraje de llenado del sistema.
- Registrar el tiempo de llenado con las válvulas de aire cerradas.
- Abrir completamente la válvula de regulación de caudal y abrir las purgas celestes para liberar el agua de la línea principal. De la misma manera abrir la válvula roja del punto C y G para permitir la purga eficiente de la línea principal.
- Cerrar la válvula roja en C, G y las dos válvulas de purga celestes.
- Repetir el proceso de cronometraje de llenado con las válvulas de aire abiertas y registrar los tiempos de llenado.
- Calcular el ahorro en tiempos de llenado.
- Tapar las válvulas de aire y vaciar la línea principal abriendo completamente la válvula de alivio de caudal.
- Cerrar levemente la válvula de regulación de caudal de manera que la entrada de agua en el punto C sea ligera y lenta (13-18 l/min), para que permita la formación de grandes burbujas de aire. Visualizar que los tramos de pendientes positivas están completamente llenos, mientras que en los tramos de pendiente negativa están parcialmente vacíos.
- Abrir la válvula de aire ubicada en E y visualizar el beneficio de llenado del tramo C-D.
- Permitir que se llene completamente el tramo C-D, si es necesario, enviar un poco más de caudal a la línea principal.

- Abrir la válvula de aire en G y analizar lo ocurrido en el tramo F-G. Si es necesario enviar un poco más de caudal a la línea principal.

TABLA DE RESULTADOS

LLENADO DE TUBERÍAS				
# MEDICIÓN	TIEMPO MEDIDO SIN VÁLVULA DE AIRE [S]	TIEMPO MEDIDO CON VÁLVULA DE AIRE [S]	BENEFICIO [S]	BENEFICIO %
1				
2				
3				

LLENADO A CAUDALES BAJOS		
TRAMO	OBSERVACIÓN CON VÁLVULA CERRADA	OBSERVACIÓN CON VÁLVULA DE AIRE ABIERTA
B-C		
C-D		
D-E		
E-F		

7. CONCLUSIONES

Concluir con los resultados obtenidos, proporcionando un análisis breve de las variaciones en los tiempos de llenado.

Concluir con ventajas o desventajas del accionar las válvulas de aire en el llenado del sistema basándose en lo observado durante la práctica.

Concluir con beneficios de la instalación de válvulas de aire respecto a los fenómenos transitorios que pueden ocurrir al momento del llenado del sistema.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones que puedan sugerir mejoras para el desarrollo de futuras prácticas.

Recomendaciones para obtener mayores beneficios en el llenado del sistema.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Thomas, S. (2003). Air management in water distribution systems, a new understanding of air transfer, clear water legacy. Ontario: Mapalé.
- Vayremex Mr. (28 de enero de 2018). Eliminadora de aire modelo EAP. Obtenido de Vayremex: <http://vayremex.com/nw-admin/files/pdf/VEA-EAP-2018.pdf>
- Iglesias-Rey, P. L., Fuertes-Miquel, V. S., García-Mares, F. J., & Martínez-Solano, J. F. (14 de enero de 2016). Caracterización de válvulas de admisión y expulsión de aire comerciales. Obtenido de Universitat Politècnica de València: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n1/2007-2422-tca-7-01-00057.pdf>

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Discusión sobre los resultados con y sin la operación de válvulas de aire

LLENADO DE TUBERÍAS	
<i>TIEMPO MEDIDO SIN VÁLVULA DE AIRE [S]</i>	<i>TIEMPO MEDIDO CON VÁLVULA DE AIRE [S]</i>
11,32	8,56
10,36	9,01
9,24	8,51
9,56	8,48
10,31	8,9
9,67	8,36
9,43	8,29
10,14	8,9
11,06	9,14
9,79	8,51

Tabla 49. Resultados del llenado de tuberías con y sin la operación de válvulas de aire. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Durante el proceso de llenado en sistemas irregulares se pueden generar bolsas de aire en los puntos altos provocando dificultad para el llenado de las tuberías. Además, si el aire acumulado no es evacuado puede ocasionar daños en el sistema, por lo tanto, es importante realizar una práctica donde se vea reflejado el beneficio del uso de válvulas de aire en el llenado de tuberías. Una vez realizada la práctica se pudo analizar que el tiempo que se necesita para llenar la tubería es en promedio 1.422 segundos mayor sin el uso de válvulas de aire.

A través del modelo hidráulico se puede observar que las válvulas de aire benefician a la eficacia de llenado de las tuberías, si bien la diferencia de tiempos es pequeña, el beneficio en tiempos puede ser mayor al tratarse de sistemas de distribución de agua más complejos y grandes.

Por otro lado, la instalación de válvulas de aire permite que el sistema sea más eficaz y óptimo al momento de transportar el agua. La válvula de aire sirve para introducir y/o expulsar aire en un sistema presurizado.

Al presentar pendientes tan pronunciadas se ha generado en ciertos puntos alejados de la bomba presiones muy bajas, incluso se han llegado a tener presiones negativas. Las presiones negativas pueden ser perjudiciales para el sistema pudiendo provocar inclusive roturas en las tuberías o accesorios, por lo que la instalación de las válvulas de aire permite que el aire ingrese evitando que el sistema colapse en su operación.

5.2 Discusión sobre los resultados de purgas en el sistema

PURGA DE UNA LÍNEA DE CONDUCCIÓN A PRESIÓN				
ESCENARIO	TIEMPO MEDIDO SIN VÁLVULA DE AIRE [S]	OBSERVACIONES	TIEMPO MEDIDO CON VÁLVULA DE AIRE [S]	OBSERVACIONES
A	NA	No ocurre purga, el agua se queda estancada	8,89	Se vacía B-C y C-D, D-E queda parcialmente lleno
			13,57	Se vacía B-C y C-D, D-E y EF lleno
			11,75	Se vacía B-C y C-D, D-E y EF parcialmente lleno
			12,47	Se vacía B-C y C-D, D-E y EF lleno
			11,24	Se vacía B-C y C-D, D-E y EF parcialmente lleno
B	NA	No ocurre purga, el agua se queda estancada	10,31	B-C y C-D parcialmente llenos; DE y EF si se vaciaron
			10,25	
			10,57	
			10,48	
			10,52	
C	NA	No ocurre purga, el agua se queda estancada	9,26	Se vacía la línea principal; no se vacía los extremos de entrada y salida
			8,1	
			7,64	
			8,36	
			9,01	
D	25,99	Queda lleno únicamente el extremo de entrada A-B	11,36	Queda lleno únicamente el extremo de entrada A-B
	26,03		10,9	
	26		12,08	
	25,89		11,51	
	26,06		11,84	
E	28,7	Vaciado total	12,84	Vaciado total
	28,31		11,95	
	28,95		12,71	
	28,51		12,03	
	28,46		12,24	
F	26,62	Lleno de A-F, vacío de F a tanques	10,85	Parcialmente lleno de D-F y A-D lleno
	27		10,76	
	26,72		10,63	
	26,81		10,48	
	27,14		10,64	
G	13,94	Agua estancada en los puntos bajos C y E	12,93	Parcialmente lleno de B-E y E-F lleno, entrada y salida vacío
	12,96		11,02	
	13,34		11,74	
	13,57		11,68	
	13,86		12,04	

Tabla 50. Resultado de purgas en el sistema. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

NOTA: Los tiempos medidos que exceden el minuto han sido descartados, y deberán ser descartados en la práctica de laboratorio.

Un sistema de agua siempre necesita mantenimiento, por lo cual es necesario realizar la purga del sistema de manera eficaz y óptima. Para esta práctica se trabaja con distintos escenarios que permiten reconocer la importancia de la purga en el sistema, su localización e instalación.

Se puede observar que en la purga del sistema de transporte de agua a presión el accionar de las válvulas de aire permite realizar dicha actividad en menos tiempo y de una forma integral, evitando estancamiento de agua y generando un sistema libre de impurezas o sedimentos y listo para un nuevo accionar.

En los distintos escenarios establecidos se puede determinar que con la utilización de válvulas de aire se realiza una purga de mayor cantidad de agua y en menor tiempo. Además, los distintos escenarios demuestran la óptima posición de las válvulas de entrada y salida al momento de la purga.

Las válvulas de aire permiten el ingreso de grandes cantidades de aire debido a las depresiones que se presentan durante la purga del sistema, evitando de esta manera colapsos o roturas.

5.3 Análisis de los efectos en la presión, potencia y energía de una línea de conducción con y sin el accionar de las válvulas de aire

CAUDAL		DENSIDAD (kg/m ³)	SIN VÁLVULAS DE AIRE						CON VÁLVULAS DE AIRE						PÉRDIDA DE ALTURA DE BOMBEO
			PRESIÓN		TDH	POTENCIA		ENERGÍA	PRESIÓN		TDH	POTENCIA		ENERGÍA	
(lt/min)	(lt/s)		PSI	kg/m ²	m	w	hp	J	PSI	kg/m ²	m	w	hp	J	m
10,00	0,167	999	-	-	-	-	-	0,00	0,68	479,092	0,480	0,783	0,001	2819,935	0,480
11,25	0,188	999	-	-	-	-	-	0,00	0,75	528,410	0,529	0,972	0,001	3499,000	0,529
12,29	0,205	999	-	-	-	-	-	0,00	0,78	549,547	0,550	1,104	0,001	3975,362	0,550
13,12	0,219	999	-	-	-	-	-	0,00	0,80	563,637	0,564	1,209	0,002	4352,652	0,564
14,16	0,236	999	-	-	-	-	-	0,00	0,83	584,774	0,585	1,354	0,002	4873,842	0,585
15,00	0,250	999	-	-	-	-	-	0,00	0,86	605,910	0,607	1,486	0,002	5349,582	0,607
16,04	0,267	999	0,05	35,227	0,035	0,092	0,000	332,59	0,88	620,001	0,621	1,626	0,002	5853,521	0,585
17,08	0,285	999	0,15	105,682	0,106	0,295	0,000	1062,45	1,00	704,547	0,705	1,968	0,003	7083,013	0,599
18,12	0,302	999	0,25	176,137	0,176	0,522	0,001	1878,57	1,07	753,865	0,755	2,233	0,003	8040,297	0,578
19,16	0,319	999	0,50	352,273	0,353	1,104	0,001	3972,79	1,16	817,274	0,818	2,560	0,003	9216,874	0,465
20,20	0,337	999	0,62	436,819	0,437	1,443	0,002	5193,66	1,22	859,547	0,860	2,839	0,004	10219,775	0,423
21,04	0,351	999	0,67	472,046	0,473	1,624	0,002	5845,89	1,35	951,138	0,952	3,272	0,004	11779,033	0,480
22,08	0,368	999	0,70	493,183	0,494	1,780	0,002	6409,55	1,43	1007,502	1,009	3,637	0,005	13093,786	0,515
23,12	0,385	999	1,02	718,638	0,719	2,717	0,004	9779,53	1,50	1056,820	1,058	3,995	0,005	14381,667	0,339
24,16	0,403	999	1,10	775,002	0,776	3,061	0,004	11020,97	1,55	1092,048	1,093	4,314	0,006	15529,546	0,317
25,00	0,417	999	1,25	880,684	0,882	3,600	0,005	12959,26	1,65	1162,502	1,164	4,752	0,006	17106,222	0,282
26,04	0,434	999	1,37	965,229	0,966	4,110	0,006	14794,21	1,85	1303,412	1,305	5,549	0,007	19977,579	0,339
27,08	0,451	1000	1,55	1.092,048	1,092	4,835	0,006	17406,46	1,95	1373,866	1,374	6,083	0,008	21898,452	0,282
28,12	0,469	1001	1,80	1.268,184	1,267	5,831	0,008	20990,27	2,12	1493,639	1,492	6,867	0,009	24721,870	0,225
29,16	0,486	1002	1,87	1.317,503	1,315	6,281	0,008	22613,06	2,20	1550,003	1,547	7,390	0,010	26603,596	0,232
30,20	0,503	1003	2,10	1.479,548	1,475	7,306	0,010	26300,04	2,30	1620,458	1,616	8,001	0,011	28804,804	0,140

Tabla 51. Resultados de los efectos en la funcionalidad de una línea de conducción con y sin válvulas de aire.

(Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

En las prácticas y en los resultados anteriores se ha podido establecer la funcionalidad de las válvulas de aire. El aire ingresa cuando se tienen depresiones y es expulsado cuando se acumula en los puntos altos del sistema. Al tener esto claro, en esta práctica se pretende analizar los efectos que pueden generar las acciones antes mencionadas y los impactos que pueden tener con el consumo energético.

Para poder determinar los efectos que puede presentar la utilización de válvulas de aire, se tomó datos de las presiones con distintos caudales desde 10 lt/min a 30 lt/min que marca el punto B con y sin válvulas de aire.

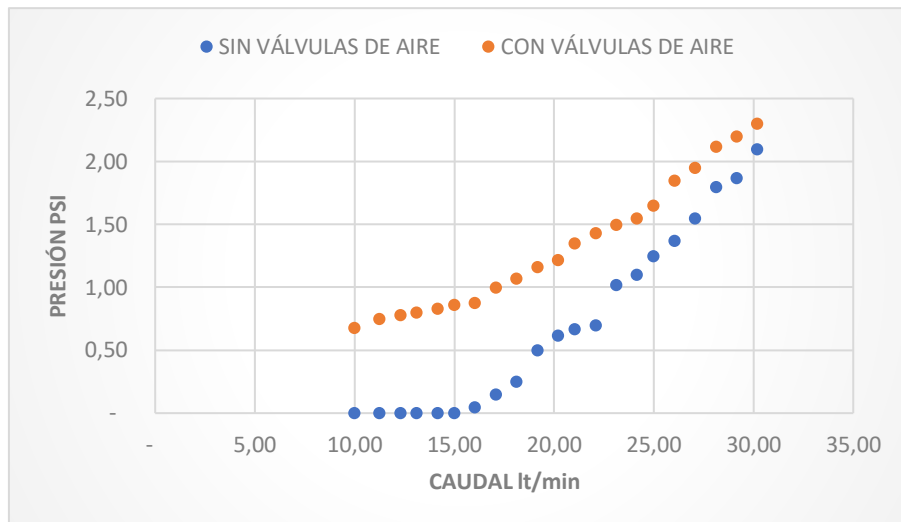


Figura 40. Presión punto B con y sin válvulas de aire. (Elaborado por: Paula Jaramillo y Jack Vásquez)

Se observó que al utilizar válvulas de aire la presión incrementa, al trabajar con caudales pequeños la diferencia de presiones es más grande como se puede observar en la figura 39. Una vez analizada la presión en el punto B, se procedió a determinar la altura de bombeo con la que se trabaja en ambos escenarios.

El análisis muestra que, al utilizar las válvulas de aire y trabajando con el mismo caudal, la bomba puede elevar más el agua. Se determina entonces, que con las válvulas de aire se tiene una mayor altura de bombeo. Las pérdidas de altura observadas varían entre 0.140 m y 0.607m.

Una vez obtenida la altura de bombeo, se puede calcular la potencia de la bomba y la energía que consume la misma en una hora de trabajo. Se pudo establecer que se consume mayor energía con las válvulas de aire abiertas debido a que en el punto G ingresa el aire en lugar de salir debido a q no existe presión. A pesar de lo antes mencionado las válvulas de aire permiten que el sistema funcione sin colapsar o presentar daños.

5.4 Análisis de las consecuencias operacionales y de costos al utilizar válvulas de aire

Una vez determinado el beneficio en las presiones y altura de bombeo que produce la utilización de válvulas de aire, se puede notar la diferencia que conlleva su uso en el modelo construido, sin embargo, se debe recordar que al trabajar en un proyecto de gran escala este beneficio va a ser mucho más importante y trascendental, generando menores gastos operacionales.

Con la utilización de válvulas de aire podemos llegar a una mayor altura de bombeo y tenemos mayores presiones lo cual nos ahorra costo al no tener que utilizar una bomba de mayor potencia, además de generar ahorros en repuestos y detención de operación dado el control que permiten tener sobre las sub-presiones y sobre presiones, evitando colapso o roturas de tuberías o accesorios.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- El equipo diseñado y construido ha demostrado que se puede replicar los efectos de presión con la construcción de modelos hidráulicos elaborados en laboratorio.
- Este equipo permite evidenciar a través de distintas prácticas, el comportamiento de las válvulas de aire y de purga tanto en la fase de operación como en la de mantenimiento. Además, evidencia beneficios que éstas generan en líneas de conducción sometidas a presiones bajas.
- El funcionamiento del equipo evidencia la importancia de la ubicación tanto de las válvulas de aire como las de purga. Se dispondrá de un óptimo funcionamiento y se observarán beneficios en fase de operación y de mantenimiento del sistema, si se realiza un correcto prediseño tanto de su localización como de su tamaño y tipo de válvula. Para garantizar la óptima instalación de las válvulas de aire y purga, el prediseño debe considerar acertadamente el caudal a transportar y el diámetro y material de la tubería a utilizar
- La localización de las válvulas de aire ha sido producto de la planificación y estimación de los lugares donde se presenta una mayor posibilidad de formación bolsas de aire. El diámetro de salida de aire de esta ha sido verificado en el diseño, y dado el caso de que el modelo es pequeño, se ha recurrido a la selección de una válvula de 3/4" de entrada, con el tamaño de orificio más pequeño posible. Se presenta además una relación directa entre el diámetro de la tubería a utilizar y el diámetro de la válvula de aire, buscando que ésta última tenga un diámetro de al menos la mitad del diámetro escogido para la tubería. La limitada oferta en el mercado local fue otro factor clave para la selección del diámetro de la válvula de aire.
- De acuerdo con el análisis de resultados, se ha comprobado que las válvulas de aire benefician y protegen la línea de conducción a presión y su sistema de bombeo, no solo en la operación sino también en el llenado y vaciado de sus tuberías. Se presenta un transporte de agua más eficaz, aumentando el caudal de trabajo y acortando tiempos de trabajo, lo que puede generar ahorro de capital para el operador del proyecto.
- El llenado de la línea de conducción es uno de los puntos más críticos en el funcionamiento del equipo y se evidencia que se tiene un ahorro de tiempo al momento de llenar el sistema con el accionar de las válvulas de aire. Además, que las mismas protegen el sistema al momento de llenarlo de agua cuando se tienen variaciones bruscas de presión interna, causadas por los fenómenos transitorios.

No obstante, el efecto de golpe de ariete es muy bajo debido al poco caudal transportado y a las bajas presiones de trabajo causadas por la baja potencia de la bomba. No se presenta cavitación en la zona de succión debido a que se construyó el tramo de succión lo más corto posible.

- Al realizar el llenado de las tuberías con las válvulas de aire cerradas, se observa que los tramos de tubería de pendiente positiva se llenan por completo de agua. Por otro lado, los tramos de tubería con pendiente negativa presentan la aparición de bolsas de aire de gran longitud, llegando a exceder varias veces el diámetro del tubo. Al accionar las válvulas de aire instaladas, se evidencia que los tramos de pendiente negativa empiezan a llenarse por completo de agua evacuando el aire por las válvulas de aire o por la salida de agua al final de la línea de conducción. Esto evidencia el beneficio de la instalación de válvulas de aire para el llenado del sistema a presión.
- Se presentan dos tipos de mecanismos de purga utilizados en el equipo, el primero en el punto D donde se utiliza una Tee en su salida, y el segundo en el punto F donde se utilizó un collarín abrazado al tubo de PVC el cual tiene una perforación en su costado frontal. Este contraste de los mecanismos de purga permite concluir que la correcta instalación de una válvula de purga se la debe realizar como la construida en el punto D con la instalación de una Tee en lugar de perforar el tubo de PVC. Además, el escenario E establecido en la práctica número 2, permite verificar que la purga integral del sistema se obtiene cuando se dejan abiertas tanto las válvulas de purga como válvulas de entrada y salida de agua de la línea principal.
- Al activar las válvulas de aire se concluye que la presión incrementa en los puntos que se encuentran antes del punto crítico del sistema donde la presión empieza a ser negativa. A caudales bajos (10 a 20 lt/min) el incremento es mucho más significativo que a caudales altos (20 a 30 lt/min). Los datos tomados de presión en el punto B, indican la altura de bombeo generada por la bomba.
- La instalación de una válvula de aire y su accionar en el sistema, se enfoca en la funcionalidad al usuario en dicho punto y puede ser motivo de solución en proyectos ya existentes. Todos los puntos después del punto crítico no presentan aumento alguno de presión. Cabe recalcar que el equipo trabaja a caudales relativamente bajos dado el limitado espacio y el tamaño de la bomba, por lo que la calificación de caudales altos y bajos usada previamente son únicamente para diferenciar los rangos mostrados.

- En el sistema hidráulico estudiado se pudo presenciar vacío a partir del punto G. Por esta razón, al utilizar las válvulas de aire, la presión en el sistema aumenta aguas arriba del punto crítico, pero permite ingreso de aire al sistema a partir del punto G. Debido a este fenómeno, la altura de bombeo aumenta considerablemente, provocando un aumento de la potencia de la bomba y por consiguiente un mayor consumo de energía por parte del sistema. Si se tuviese presiones positivas a lo largo de todo el sistema, las válvulas de aire únicamente expulsaran aire, lo que provocase el efecto contrario tanto en la potencia de la bomba como en su consumo.

6.2 Recomendaciones

- Para replicar adecuadamente los efectos de presión con la construcción de modelos hidráulicos elaborados en laboratorio, realizar un prediseño detallado con todos los accesorios a utilizar.
- Para evidenciar el comportamiento de las válvulas de aire y purga, leer detenidamente las guías de laboratorio previo al uso del equipo, realizando una lista de chequeo de todos los pasos previos al encendido y funcionamiento del equipo.
- Se debe encender el equipo y cambiar el agua periódicamente para evitar daños en el sistema de bombeo. Además, es indispensable verificar que el tanque de almacenamiento tenga agua hasta la marca inicial de trabajo, evitando que la bomba succione aire y se dañe.
- Para observar beneficios generados por la instalación de válvulas de aire y purga, se recomienda analizar previamente las localizaciones óptimas de cada una de ellas.
- El adecuado funcionamiento de las válvulas de aire, requiere un prediseño previo tanto de diámetros como de materiales a utilizar, teniendo en cuenta la disposición del mercado local.
- La apertura de las válvulas de aire debe ser controlada según lo requiera el equipo, dado que, si se tiene presiones negativas en algún punto y se acciona las válvulas incorrectamente, ingresará aire al sistema a partir del punto de presión negativa, y no se llenarán los tramos de pendiente negativa deseados.
- Para evitar la presencia del golpe de ariete en el funcionamiento del equipo, se recomienda evitar el cierre brusco de las válvulas de salida de agua.

- En el llenado de las tuberías de pendiente negativa, se debe accionar únicamente la válvula de aire aguas abajo del tramo en análisis.
- Para vaciar integralmente el sistema, se recomienda abrir totalmente las válvulas de bola instaladas en cada salida, además de las válvulas de ingreso y salida de agua de la línea principal. Además, se recomienda abrir las válvulas de aire al momento de purgar el sistema.
- Se recomienda verificar que el manómetro utilizado esté encerado previo a cada medición. Además, no quitar el manómetro del punto de control de presión entre cada medición.
- Analizar el efecto de consumo de energía en un sistema sin presiones negativas a lo largo de su línea principal.
- Calibrar la precisión del caudalímetro a través del parámetro k. Si la precisión de la medición es imprecisa, se debe consultar al fabricante por el valor de k. Para ingresar este valor, presionar el botón MENU y dirigirse a la opción del parámetro k. Realizar la calibración cada seis meses.
- Encender la bomba cada dos semanas, para garantizar el funcionamiento de la misma y evitar que los empaques del rotor se peguen.

Bibliografía

- A.R.I. (2012). Soluciones con ventosas . *Nueva minería y energía*, 116.
- Aguirre Morales, F. (14 de Septiembre de 2015). *Abastecimiento de Agua para comunidades rurales*. Obtenido de Universidad Técnica de Machala:
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/AGUIRRE%202015.%20Abastecimiento%20de%20agua%20para%20comunidades%20rurales.pdf
- ANSYS, Inc. (12 de Septiembre de 2019). *ANSYS. Fluids*. Obtenido de Cavitation:
<https://www.ansys.com/products/fluids/cavitation>
- Beléndez, A. (2 de Marzo de 1992). *Acústica, Fluidos y Termodinámica*. Obtenido de Escuela Univesitaria Politécnica:
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/14059/1/AcusticaFluidosTermodinamica1992.pdf>
- Bueche, F. J., & Hecht, E. (2007). *Física General*. México D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Cadavid , J. H. (2006). *Hidráulica de canales Fundamentos*. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Camacho Ramírez, D. E., & Meza Reina, J. D. (6 de Septiembre de 2017). *Diseño y Construcción de un Sistema de Bombeo de Ariete Hidráulico Multipulsor a Escala de Laboratorio*. Obtenido de UCE:
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/10044/1/T-UC-0017-009-2017.pdf>
- Care Perú. (2001). *Agua potable en zonas rurales, operación y mantenimiento de sistemas por gravedad sin planta de tratamiento*. Lima: Usaid Perú.
- Chafla Barahona, Á. V. (20 de Enero de 2016). *Operación del sistema de abastecimiento de agua potable de la parroquia Río Negro, cantón Baños, provincia Tungurahua*. Obtenido de Tesis de Grado:
<http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24447/1/Tesis%201081%20-%20Chafla%20Barahona%20Angel%20Vladimir.pdf>
- Chulluncuy Centeno, J. M., & Diaz Vivanco, G. (27 de Enero de 2019). *Análisis y validación experimental del factor de fricción usando las ecuaciones de Colebrook-White y Barr en tuberías estandarizadas*. Obtenido de Universidad Nacional del Centro del Perú:
<http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/4838/Chulluncuy%20Centeno%20-%20Diaz%20Vivanco.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Comisión Nacional del Agua. (27 de agosto de 2016). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO*. Obtenido de Conducciones:
<http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro10.pdf>
- Conagua, México D.F. (27 de Agosto de 2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Obtenido de Fenómenos Tranfistorios en Líneas de Conducción:
<http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro11.pdf>

- Corcos, G. (22 de Febrero de 2005). *Aire en tuberías de agua*. Obtenido de Agua Para La Vida: <https://aplv.org/files/Aire%20En%20Tuberias.pdf>
- Curimilma Rivera, B. F., & Erreyes Medina, X. E. (16 de Octubre de 2012). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para analizar los métodos de ajuste de máximo rendimiento de una bomba hidráulica instalada a una red en operación*. Obtenido de Universidad Nacional de Loja: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/12342/1/Curimilma%20Rivera%20Byron%20Fabi%C3%A1n%20Erreyes%20Medina%20Xavier%20Emilio.pdf>
- Das, G. P. (23 de Diciembre de 2015). *Hydraulic Engineering : Fundamental Concepts*, Momentum Press. Obtenido de ProQuest Ebook Centra: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/puce/detail.action?docID=4307183>.
- Fay, J. A. (1998). *Introduction to Fluid Mechanics*. Londres: Massachusetts Institute Of Technology.
- Foras. (4 de Octubre de 2017). *Foras Water Pumps*. Obtenido de Catálogo 50Hz: https://admin.pentax-pumps.it/WebResource/Foras/Serie/PdfCatalogo/PE_50HZ.pdf
- Gandarillas Prieto, I. (16 de Mayo de 2011). *Artículos*. Obtenido de Utilización de ventosas como elemento de protección en transitorios hidráulicos: <https://www.arivalves.com/es/library/articles/ventosas>
- García Mares, F. J. (24 de Septiembre de 2015). *Desarrollo de equipos para el ensayo de ventosas mediante la aplicación de la semejanza hidrodinámica*. Obtenido de Universitat Politècnica de València: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/72373/Garc%C3%ADa%20-%20Desarrollo%20de%20equipos%20para%20el%20ensayo%20de%20ventosas%20mediante%20la%20aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20semejanza%20...pdf?sequence=1>
- García Sánchez, A. (17 de Marzo de 2013). *División de estudios de posgrado - Aire Atrapado en Conductos a Presión*. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/6279/Tesis.pdf?sequence=1>
- García Trisolini, E. (21 de Junio de 2009). *Manual de proyectos de agua potable en poblaciones rurales*. Obtenido de Fondo Perú-Alemania: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GARCIA%202009.%20Manual%20de%20proyectos%20de%20agua%20potable%20en%20poblaciones%20rurales.pdf
- García, J. (16 de Septiembre de 2013). *Sistemas de conducción de agua para la región altoandina*. Obtenido de CIPAF - Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Pequeña Agricultura Familiar: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/GARC%C3%8DA%202013.pdf

202013.%20Sistemas%20de%20conducci%C3%B3n%20de%20agua%20para%20la%20regi%C3%B3n%20altoandina.pdf

- Giles, R. V., & Evett, J. B. (2003). *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. Madrid: McGraw-Hill.
- Guarín R., J. A., & Flores G., J. C. (26 de Abril de 2013). Diseño de un sistema de generación a partir de una picocentral hidroeléctrica. Pereira, Pereira, Colombia.
- Guerrero Angulo, J. Ó. (1995). Ecuación modificada de Colebrook-White. *Ingeniería Hidráulica en México*, 47.
- Haestad Methods Staff. (2002). *Computer Applications in Hydraulic Engineering*. Pennsylvania: Haestad Methods, Inc.
- Iglesias-Rey, P. L., Fuertes-Miquel, V. S., García-Mares, F. J., & Martínez-Solano, J. F. (14 de Enero de 2016). *Caracterización de válvulas de admisión y expulsión de aire comerciales*. Obtenido de Universitat Politècnica de València: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n1/2007-2422-tca-7-01-00057.pdf>
- Khan Academy. (4 de Febrero de 2019). *Tasa de Flujo Volumetrico*. (©. 2. Academy, Editor) Obtenido de ¿Qué es la tasa de flujo volumétrico?: <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-volume-flow-rate>
- Kodura, A. (23 de Mayo de 2016). *An Analysis of the Impact of Valve Closure Time on the Course of Water Hammer*. Obtenido de Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/heem.2016.63.issue-1/heem-2016-0003/heem-2016-0003.pdf>
- Kodura, A., & Weinerowska, K. (7 de Septiembre de 2005). *Some Aspects of Physical and Numerical Modeling of Water Hammer in Pipelines*. Obtenido de International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering: https://www.researchgate.net/profile/Apoloniusz_Kodura/publication/228882213_Some_aspects_of_physical_and_numerical_modeling_of_water_hammer_in_pipelines/links/0c96051c4ccdf14e6e000000/Some-aspects-of-physical-and-numerical-modeling-of-water-hammer-in-pip
- Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (28 de Septiembre de 1999). *Taylor & Francis Group an informa business*. Obtenido de Hydraulics of Pipeline Systems: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781420050318>
- Larson , M. (29 de Marzo de 2005). *Water and Wastes Digest*. Obtenido de ROCK N' ROLL PIPELINES: THE CAVITATION PHENOMENON: <https://www.wwdmag.com/rock-n%20%99-roll-pipelines-cavitation-phenomenon>
- Ledoux, M., & El, A. H. (2017). *Fluid Mechanics : Analytical Methods*. Obtenido de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/puce/detail.action?docID=4790364&query=bernoulli#>

- LKS. (Julio de 2017). *AMPLIACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO SANITARIO EN LA LOCALIDAD DE CHUQUIBAMBA, DISTRITO DE CHUQUIBAMBA, PROVINCIA DE CONDESUYOS, DEPARTAMENTO Y REGIÓN DE AREQUIPA*. Obtenido de <https://www.sedapar.com.pe/wp-content/uploads/2018/02/Manual-operacion-agua.pdf>
- Machuca Chiguano, A. P., & Yépez Fajardo, J. Á. (12 de Mayo de 2009). *Tesis de grado*. Obtenido de Diseño, construcción y experimentación de un viscosímetro Saybolt y desarrollo de un sistema de control temperatura en cascada para el laboratorio de fluidos de la Facultad Mecánica: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/264/3/15T00412.pdf>
- Martin D., I. R. (3 de Abril de 2008). *Distribución de flujos en sistemas de colectores solares planos interconectados*. Ciudad de México, Ciudad de México, México.
- Méndez, M. V. (2007). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas: Editorial Texto.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación de México.
- Narváez, W. D. (15 de Julio de 2011). *UIDE*. Obtenido de Rehabilitación del Sistema de Agua Potable Sambache- Salcoto y Diseño de la Línea de Impulsión al Tanque de Reserva Mushuñan: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/2047/1/T-UIDE-1177.pdf>
- Ordoñez Viñán, M. A., & Quisnancela Salazar, K. G. (4 de Enero de 2013). *Automatización del banco de pérdidas del laboratorio de turbomaquinaria de la Facultad Mecánica*. Obtenido de Tesis de grado: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2961/1/15T00546.pdf>
- Organización Panamericana de la Salud. (14 de Septiembre de 2004). *Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimiento de agua rural*. Obtenido de OPS: <https://www.itacanet.org/esp/agua/Seccion%20Gravedad/disenosistemagua/Gu%C3%ADa%20de%20dise%C3%B1o%20para%20l%C3%ADneas%20de%20conducci%C3%B3n.pdf>
- Ortiz Aguirre, R. (1996). *Glosario Geohidrológico*. En R. Ortiz Aguirre, *Glosario Geohidrológico* (pág. 39). San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Palma Jaramillo, J. A. (12 de Febrero de 2010). *Diseño y construcción de un prototipo de eductor para la eliminación de la cavitación en bombas centrífugas*. Obtenido de Tesis de grado: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/16437/1/Palma%20Jaramillo,%20Jos%C3%A9%20Alberto.pdf>
- Pazmiño, J. A., Vivas, R. J., Tafur, V. L., & Ordóñez, W. I. (Junio de 2017). *Determinación del coeficiente de descarga de un prototipo tubo de Venturi construido para uso académico en laboratorio*. Quito: UCE. Obtenido de

Determinación del coeficiente de descarga de un prototipo tubo de Venturi construido para uso académico en laboratorio.

- Plastigama. (14 de Junio de 2018). *Fichas de Productos*. Obtenido de Línea de Complementos: <http://plastigamawavin.com/wp-content/uploads/2018/09/Li%CC%81nea-de-Complemetos.pdf>
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., & Ramadan, B. H. (2015). *Mecánica de flúidos*. México D.F.: Cengage Learning .
- Pozos-Estrada, O., Fuentes, O. A., Sánchez, A., Rodal, E. A., & de Luna, F. (11 de Marzo de 2016). *Análisis de los efectos del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos a bombeo*. Obtenido de Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0213131516000055?token=DBADBF A6B0546A53319BE8F4FE638EF4D8EFAE90E7446D88A37D2B926051893B9AECC83B3A63E7DAF5C839C7EFF1D7F>
- Ramírez, O. (12 de Noviembre de 2017). *Diseño y construcción de banco hidráulico para determinar pérdidas de energía en tuberías PVC*. Obtenido de Universidad Católica de Colombia: <https://core.ac.uk/download/pdf/143468528.pdf>
- Rios A., L. G., & Mustafá Iza, Y. (16 de Marzo de 2008). *Guías prácticas para los sistemas de flujo*. Obtenido de Scientia et Technica: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4733252.pdf>
- Rival. (6 de Julio de 2018). *Manual de flujo de tuberías a presión*. Obtenido de Manual de flujo de tuberías a presión: http://plasticosrival.com/files/products/pvc/technical-manuals/PR_PVC_MT_FlujoTuberiasPresion.pdf
- Rodriguez Ayala, Y. M. (11 de Septiembre de 2014). *Mejoramiento del sistema de bombeo para evacuación eficiente de aguas subterráneas en volcan Compañía Minera S.A.A - Unidad San Cristobal*. Obtenido de Tesis: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3215/Rodriguez%20Ayal a.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Saldarriaga, J. G. (1998). *Hidráulica de tuberías*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S. A.
- Sánchez, M., Bladé, E., & Puertas, J. (2005). *Hidràulica*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Schlag, A. (1966). *HIDRÁULICA*. LIMUSA-WILEY.
- Sedapar. (2 de Julio de 2017). *LKS*. Obtenido de Ampliación y Mejoramiento del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario en la Localidad de Chuquibamba, Distrito de Chuquibamba, Provincia de Condesuyos, Departamento y Región de Arequipa: <https://www.sedapar.com.pe/wp-content/uploads/2018/02/Manual-operacion-agua.pdf>
- Serrano, A. S. (2009). *Neumática práctica*. Madrid: Paraninfo S.A.

- Tandalla G., B. A. (26 de Octubre de 2012). *Evaluación, diagnóstico y rediseño del sistema de agua segura para el barrio Santa Rosa de Pichul, Parroquia Eloy Alfaro, Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi*. Obtenido de UCE: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/392/1/T-UCE-0011-18.pdf>
- Tavera, M. (22 de Enero de 2013). *Metodología para la gestión y planificación de un sistema de agua potable con suministro intermitente: Aplicación a la Ciudad de Tegucigalpa (Honduras)*. Obtenido de Tesis Doctoral: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/21067/TESIS%20DOCTORAL%20MT%20DEF.pdf?sequence=11>
- The Process Piping. (27 de Octubre de 2018). *The Process Piping*. Obtenido de Introduction to Cavitation: <https://www.theprocesspiping.com/introduction-to-cavitation/>
- Thomas, S. (2003). *Air management in water distribution systems, a new understanding of air transfer, clear water legacy*. Ontario: Mapalé.
- TLV. (3 de Marzo de 2019). *Compañía Especialista en Vapor*. Obtenido de Beneficios de la Instalación de la Válvula Check: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/check-valve-installation-and-benefits.html>
- Vayremex Mr. (28 de Enero de 2018). *Eliminadora de aire modelo EAP*. Obtenido de Vayremex: <http://vayremex.com/nw-admin/files/pdf/VEA-EAP-2018.pdf>
- Water Environment Research Foundation. (2015). *Renewal Engineering for Drinking Water Pipelines*. Alexandria: Water Environment Research Foundation.
- White, F. (2016). *Fluid Mechanics. 8th Edition*. Nueva York: McGraw-Hill International Book Company.
- Yambombo, J. (24 de Agosto de 2012). *Diseño y construcción de un banco de pruebas para ensayos de pérdidas de carga en tuberías y accesorios*. Obtenido de Universidad Central del Ecuador: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/325>
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2009). *Física Universitaria Volumen 1*. Pearson Educación: México.
- Zamorano Bear, F. (16 de Agosto de 2017). *Análisis de aire atrapado en conductos a presión*. Obtenido de Universidad Nacional Autónoma de México: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/2511/Tesis.pdf?sequence=1>